Jim Al-Khalili

Alianza editorial

cuántica

[guía de perplejos]

Jim Al-Khalili

Cuántica

Guía de perplejos

Alianza editorial

Índice

Agradecimientos
Introducción

1.Truco de magia con la naturaleza.
Esferas de fulereno y el experimento de la doble rendija, por *Markus Arndt* y *Anton Zeilinge*
2.Orígenes
3.La probabilidad y el azar.
Desintegración radiactiva, por *Ron Johnson*
4.Conexiones misteriosas.
Caología cuántica, por *Michael Berry*
5.Mirar y ser mirado
6.El gran debate.
La realidad cuántica según De Broglie y Bohm, por *Chris Dewdney*
7.El mundo subatómico.
Componentes esenciales, por Frank Close
8.En busca de la teoría definitiva.
Pongamos el acento en lo negativo, por *Paul Davies*
9.La cuántica en acción.
Condensados de Bose-Einstein, por *Ed Hinds*. Mecánica cuántica y biología, por *Johnjoe McFadden*
10.Hacia el nuevo milenio.
Computación cuántica, por *Andrew Steane*

Bibliografía adicional
Créditos

Agradecimientos

Diversos amigos y compañeros me han ayudado enormemente para la redacción de este libro. En primer lugar y ante todo debo dar las gracias a mi esposa, Julie, y mis hijos, David y Kate, por su apoyo y comprensión durante las numerosas tardes y fines de semana de los dos últimos años que tuve que encerrarme a solas con mi ordenador. También me siento muy en deuda con las siguientes personas por suministrarme ensayos, o por leer y comentar parte o la totalidad del manuscrito, por brindarme su consejo y sugerencias, así como por la corrección de numerosos errores. Son, por orden alfabético: Jeremy Alam, Julie Al-Khalili, Nazar Al-Khalili, Reya Al-Khalili, David Angel, Marcus Arndt, Michael Berry, Frank Close, Paul Davies, Jason Deacon, Chris Dewdney, Gregers Hansen, Deen Harman, Ed Hinds, Ron Johnson, Greg Knowles, Johnjoe MacFadden, Ray Mackintosh, Abdel-Aziz Matani, Gareth Mitchell, Andrew Steane, Paul Stevenson, Ian Thompson, Patrick Walsh, Richard Wilson y Anton Zeilinger. Como es natural, los errores que puedan haber quedado son únicamente responsabilidad mía. Por último, quisiera manifestar un agradecimiento especial a mi editor de Weidenfeld & Nicolson, Nic Cheetham, por toda su ayuda.

Dedico este libro a mi padre, a quien, entre otras muchas cosas, le debo que me hablara por primera vez de una extraña teoría llamada mecánica cuántica.

Introducción

Durante la adolescencia fui un ávido lector de una revista llamada The Unexplained [«Lo inexplicado»] *que estaba repleta de supuestos avistamientos de ovnis, historias del Triángulo de las Bermudas, y otros fenómenos paranormales semejantes. Recuerdo el estremecimiento de entusiasmo que me recorría cuando abría cada número para corroborar que el mundo estaba lleno de sucesos extraños y fabulosos que nadie entendía. Lo mejor de todo eran las fascinantes fotografías que parecían tomadas con cámara barata y mano temblorosa en plena noche y en medio de una densa niebla. En teoría probaban la existencia de platillos volantes, apariciones espectrales y monstruos del lago Ness. Recuerdo sobre todo la mórbida imagen de los restos carbonizados de un pie separado del cuerpo de una anciana, aún dentro de su cálida pantufla y próximo a un cúmulo de cenizas en una sala de estar; fue lo único que quedó de un episodio de «combustión humana espontánea».*

No tengo ni idea de si aquella revista sigue publicándose hoy en día (lo cierto es que hace mucho que no la veo), pero no ha cesado la fascinación del público por toda clase de fenómenos paranormales que la ciencia no parece haber logrado etiquetar, clasificar y empaquetar. Da la impresión de que mucha gente se siente cómoda sabiendo que aún quedan rincones de nuestro universo que resisten el avance inexorable de la ciencia, donde lo mágico, lo misterioso y lo ajeno a este mundo aún perduran y prosperan.

Es una pena; me parece frustrante que todos los logros de la ciencia para explicar y racionalizar la multitud de fenómenos que acaecen en el universo se consideren a veces como algo de lo más cotidiano o carente de prodigio. Un físico que hizo hincapié en esto mismo fue Richard Feynman, quien recibió el premio Nobel en 1965 por sus aportaciones para desentrañar la naturaleza de la luz. Feynman escribió:

> Los poetas dicen que la ciencia resta belleza a las estrellas, simples globos de átomos de gas. Nada es «simple». También yo contemplo las estrellas una noche desierta y las siento. Pero ¿veo menos o veo más? [...] ¿Cuál es el patrón estructural, o el significado, o el porqué? No se estropea el misterio por saber algo más sobre él. Porque la verdad es mucho más fabulosa de lo que cualquier artista del pasado la imaginó. ¿Por qué no

hablan de ella los poetas actuales?

En estos días en que la ciencia se ha popularizado tanto que el público puede acceder a ella mediante libros, revistas, documentales de televisión e internet, creo que se está produciendo un cambio de actitud. Pero aún queda una región de la ciencia que no se puede racionalizar en su totalidad usando el lenguaje cotidiano, o explicar recurriendo a conceptos simples, fáciles de asimilar, o a cortes de entrevistas. No me refiero a ninguna idea especulativa a medio hacer basada en argumentos seudocientíficos, como la percepción extrasensorial o, peor aún, la astrología. Al contrario, el tema en cuestión cae dentro de la corriente principal de la ciencia. De hecho, es una materia de estudio tan omnipresente, tan esencial para comprender la naturaleza, que sirve de base a gran parte de todas las ciencias físicas. Se describe mediante una teoría cuyo descubrimiento supuso, sin lugar a dudas, el avance científico individual más importante del siglo XX. Por alguna curiosa coincidencia, también es el tema de este libro.

La mecánica cuántica es extraordinaria por dos razones que parecen contradictorias. Por un lado, es tan esencial para comprender el funcionamiento del mundo, que ocupa el mismísimo núcleo de la mayoría de los avances tecnológicos logrados durante el último medio siglo. Por otro lado, ¡nadie parece saber exactamente qué significa!

Cuando tratamos con el mundo cuántico realmente nos adentramos en un territorio extraordinario. Un ámbito donde parece haber libertad para elegir cualquiera de entre cierto número de explicaciones para lo observado, cada una de ellas tan asombrosamente rara a su modo, que hasta las historias de abducciones alienígenas suenan perfectamente razonables.

Si la gente supiera lo frustrante pero asombrosa que es la extraordinaria naturaleza del mundo cuántico, si supiera que la sólida realidad que conocemos descansa sobre la frágil base de una realidad insondable y fantasmagórica subyacente, entonces ya no necesitaría las historias sobre el Triángulo de las Bermudas o sobre manifestaciones *poltergeist;* los fenómenos cuánticos son mucho más extraños. Y mientras casi todos los incidentes paranormales registrados se explican nada más que con una pizca de sentido común, la teoría cuántica se ha probado, espoleado y demostrado de todas las formas imaginables durante casi cien años. Es una pena que ninguna

de las predicciones de la mecánica cuántica haya figurado, hasta donde yo sé, en algún número de *The Unexplained*.

Debo aclarar desde el principio que la teoría de la mecánica cuántica no es lo raro o ilógico. Al contrario, la teoría es una construcción matemática con una precisión y una lógica preciosas que brinda una descripción magnífica de la naturaleza. De hecho, sin la mecánica cuántica no entenderíamos los fundamentos de la química moderna, ni de la electrónica, ni de la ciencia de materiales. Sin la mecánica cuántica no habríamos inventado el chip de silicio ni el láser; no habría televisores, computadoras, hornos de microondas, reproductores de CD y DVD, teléfonos móviles, y muchas otras cosas que damos por hechas en nuestra era tecnológica.

La mecánica cuántica predice y explica con exactitud asombrosa el comportamiento de los verdaderos elementos esenciales de la materia (no ya los átomos, sino las partículas que forman los átomos). Nos ha brindado un conocimiento muy preciso y casi completo de cómo interaccionan entre sí las partículas subatómicas, y de qué manera se enlazan para conformar el mundo que observamos a nuestro alrededor, y del cual, por supuesto, formamos parte.

Por tanto, parece que estamos ante una pequeña contradicción. ¿Cómo puede una teoría científica ser tan buena explicando tantos «cómos» y «porqués», y sin embargo ser tan oscura?

La mayoría de los físicos que usan las reglas y las fórmulas matemáticas de la mecánica cuántica de manera cotidiana dirán que no tienen ningún problema con ella. Después de todo, saben que funciona. Nos ha ayudado a entender la inmensa variedad de fenómenos de la naturaleza, su estructura y formulación matemática es precisa y bien conocida y, a pesar de los numerosos intentos de muchos que han dudado de ella, ha superado con brillantez todas las pruebas experimentales imaginables a las que la han sometido. De hecho, no es nada infrecuente que los físicos se irriten con los colegas que aún se sienten incapaces de asimilar la naturaleza extraña y contraria a la intuición del mundo subatómico que nos impone la teoría. Al fin y al cabo, ¿qué derecho tenemos a esperar que la naturaleza se comporte a la escala increíblemente diminuta de los átomos de una manera que nos resulte familiar a partir de nuestras experiencias cotidianas a la escala de humanos, coches, árboles y edificios? No es que la teoría de la mecánica cuántica sea una descripción rara de la naturaleza, sino que la naturaleza de por sí se

comporta de un modo sorprendente y al margen de lo intuitivo. Y si la mecánica cuántica nos brinda las herramientas teóricas para comprender todo lo que observamos, entonces no tenemos derecho a culpar a la naturaleza (o a la teoría) de nuestra estrechez de miras intelectual.

Muchos físicos, en una actitud que yo considero más bien acientífica, se impacientan con quienes persiguen una interpretación más intuitiva de la mecánica cuántica. Dirán: «¿Por qué no te limitas a callarte y usar las herramientas cuánticas para emitir predicciones sobre resultados de experimentos? Es una pérdida de tiempo inútil empeñarse en esclarecer por completo algo que no se puede verificar de forma experimental».

De hecho, la interpretación estándar de la mecánica cuántica (la que se suele enseñar a todos los estudiantes de física) lleva incorporada una serie de reglas y condiciones estrictas de acatamiento obligado respecto al tipo de información que es posible extraer de la naturaleza, dada una configuración experimental concreta. Sé que esto sonará innecesariamente enrevesado para aparecer tan pronto en el libro, pero debe entender usted desde el principio que la mecánica cuántica no se parece a ningún otro empeño intelectual humano, ni anterior ni posterior a ella.

Como la mayoría de los físicos, he dedicado muchos años a reflexionar sobre la mecánica cuántica, tanto desde el punto de vista del profesional investigador en activo, como desde la perspectiva de quien tiene interés por su significado más profundo, el campo que se conoce como los fundamentos de la mecánica cuántica. Tal vez los aproximadamente veinte años que llevo bregando con la mecánica cuántica no hayan bastado aún para que la «asimile». Pero creo que he oído a bastantes participantes del debate (y créame que aún continúa a pesar de las optimistas y, en ciertos aspectos, falsas afirmaciones en contra por parte de quienes defienden una interpretación determinada) como para, cuando menos, apartarme de la polémica. La mayoría de lo que trato en este libro no es, espero, controvertido, y cuando abordo cuestiones de plena actualidad, procuro adoptar una postura neutral y objetiva. Yo no defiendo ninguna interpretación en particular de la mecánica cuántica, pero sí que tengo ideas muy claras sobre la materia. Usted, por supuesto, es libre de discrepar de ellas, pero estoy seguro de que lo convenceré, a menos que pertenezca usted a la brigada «calcula y calla», en cuyo caso no debería estar leyendo

este libro ¡sino haciendo algo más útil en su lugar!

Lo único que diré por ahora es que mi variante preferida se llama interpretación «calla mientras calculas». De esta manera tengo entera libertad para preocuparme por la mecánica cuántica cuando no estoy ocupado usándola.

Pero este libro no trata tan solo sobre el significado de la mecánica cuántica. También ahonda en sus logros, tanto a la hora de explicar numerosos fenómenos, como en lo referido a sus muchas aplicaciones prácticas pasadas, presentes y futuras en la vida cotidiana. De ahí que el viaje nos lleve desde la filosofía, la física subatómica y las teorías de muchas dimensiones hasta el mundo de alta tecnología de los láseres y microchips y el extraordinario horizonte de la magia cuántica del mañana.

Aunque espero que todo esto suene fascinante, es natural que los novatos absolutos en la materia se pregunten en primer lugar de qué va todo este embrollo. Hay muchas maneras de poner de relieve la extraña naturaleza de la mecánica cuántica, algunas de ellas proceden de ejemplos cotidianos con los que estamos familiarizados y que damos por hecho, mientras que otras recurren a «experimentos mentales»: situaciones ideales que pueden tenerse en cuenta sin necesidad de reproducirlas realmente en un laboratorio. De hecho, nada explica el misterio de la mecánica cuántica con tanta firmeza y belleza como el experimento de la doble rendija. Así que empezaré por ahí.

1. Truco de magia con la naturaleza

Antes de introducir demasiada ciencia desde ya en el libro, describiré un experimento sencillo. Sospecho que le sonará un poco a magia, y es posible de hecho, que no llegue a creerse una sola palabra; eso depende de usted. Como cualquier mago que se precie, en esta fase no desvelaré exactamente cómo y por qué funciona. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede con los trucos de magia, poco a poco, a medida que se desarrolle la historia, usted empezará a notar por su cuenta que aquí no hay juegos de manos, ni espejos ocultos, ni compartimentos secretos. De hecho, debería llegar a la conclusión de que no existe ninguna explicación racional para que las cosas puedan ser tal como yo las describo.

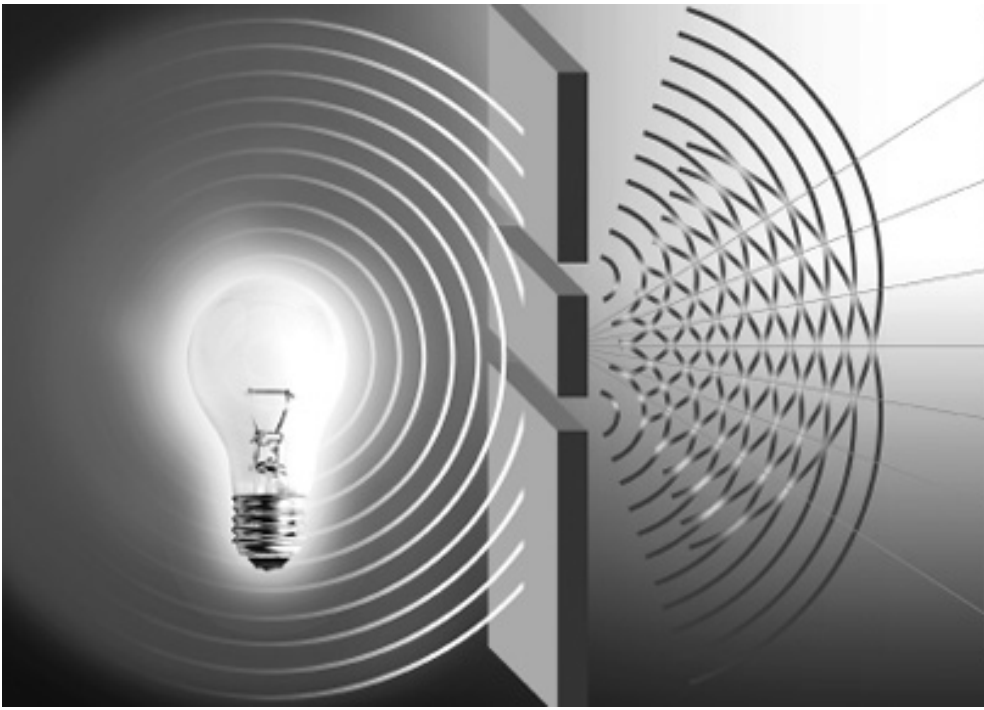
Dado que solo puedo usar adjetivos como «raro», «extraño» y «misterioso» en contadas ocasiones, no perderé más tiempo con esta fanfarria y entraré en materia. Lo que describiré es un experimento real y usted deberá creer que lo que se ve no es mera especulación teórica. El experimento es fácil de hacer con el dispositivo adecuado y se ha efectuado muchas veces de muchas formas distintas. También es importante señalar que deberé describir el experimento, no desde la ventaja de quien entiende la física cuántica, sino desde el punto de vista del lector que aún no sabe qué esperar o cómo asimilar los insólitos resultados. Daré por supuesto que usted intentará racionalizar los resultados de manera lógica a medida que avancemos de acuerdo con lo que tal vez usted considere de sentido común, lo cual difiere bastante del modo en que explicaría las cosas un experto en física cuántica. Eso vendrá después.

En primer lugar debo decir que el truco, si es que puedo llamarlo truco a estas alturas, podría realizarse simplemente arrojando luz sobre una pantalla especial; y, de hecho, así es como se describe en numerosos textos. Sin embargo, resulta que la naturaleza de la luz es muy extraña de por sí, lo que resta teatralidad al resultado. En el colegio aprendimos que la luz se comporta como una onda; puede estar formada por distintas longitudes de onda (que arrojan los distintos colores del espectro visibles en un arco iris). Exhibe todas las propiedades propias de las ondas, como la interferencia (cuando dos

ondas se mezclan), la difracción (las ondas se abren y se desparraman cuando se las obliga a pasar por un hueco estrecho), y la refracción (la desviación que experimenta una onda al atravesar distintos medios transparentes). Estos fenómenos guardan relación con la manera en que se comportan las ondas cuando se topan con una barrera o cuando se cruzan entre sí. Si digo que la luz es extraña es porque no todo se reduce a ese comportamiento de onda. De hecho, Einstein fue galardonado con el Premio Nobel por demostrar que la luz exhibe en ocasiones un comportamiento muy distinto al de las ondas, pero ahondaremos más en ello en el próximo capítulo. Para el truco de las dos rendijas podemos admitir que la luz es una onda, lo cual no arruinará lo realmente bueno de él.

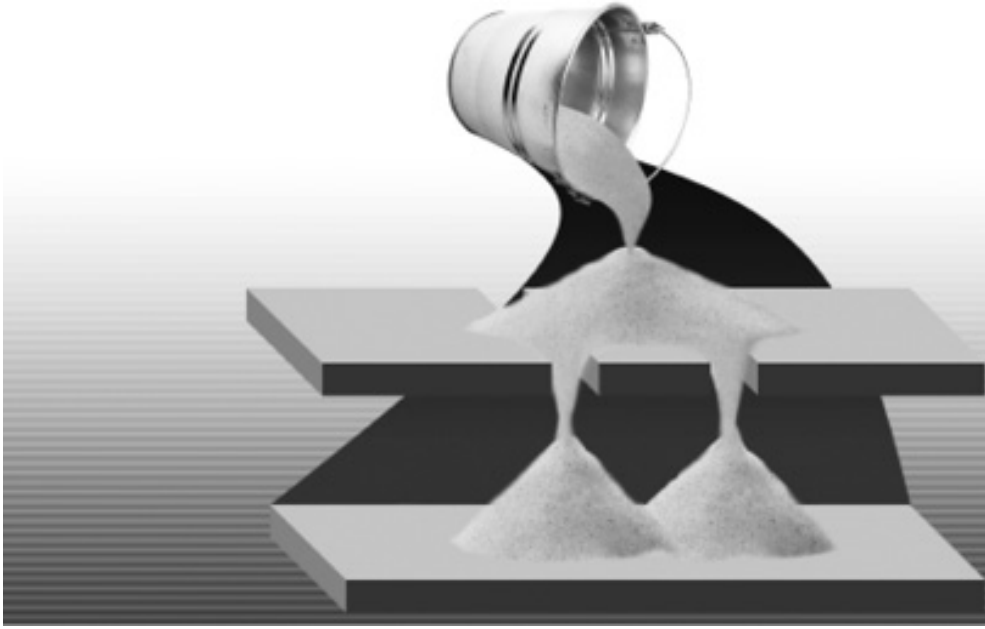
Primero se lanza un haz de luz sobre una pantalla provista de dos rendijas estrechas que permitan que parte de luz pase hasta una segunda pantalla donde se verá un patrón de interferencia. Este patrón consiste en una serie de bandas claras y oscuras debidas a la manera en que cada onda individual de luz se propaga desde las dos rendijas, se superpone y se funde con otras antes de alcanzar la pantalla del fondo. Allí donde confluyen dos crestas (o valles) de onda, se unen y dan lugar a una cresta (o valle) mayor que se corresponde con luz más intensa y, por tanto, con una banda clara en la pantalla. Pero allí donde la cresta de una onda coincide con el valle de otra, ambas ondas se anulan y dan como resultado una zona oscura. En medio de estos dos extremos queda algo de luz que genera una mezcla gradual de ambos patrones en la pantalla. Por tanto, el hecho de que aparezca el patrón de interferencia se debe tan solo a que la luz se comporta como una onda que atraviesa simultáneamente amabas rendijas. Hasta aquí, ningún problema, espero.

Ahora efectuaremos un experimento similar con arena. Esta vez, la segunda pantalla se colocará debajo de la que porta las rendijas, y la gravedad hará el resto. A medida que la arena se precipita sobre la primera pantalla, se van formando dos montículos diferenciados sobre la otra pantalla justo debajo de cada rendija. No hay nada raro aquí, puesto que cada grano de arena tiene que pasar a través de una u otra rendija; como en este caso no se trata de ondas, no se produce ninguna interferencia. Ambos montículos de arena tendrán la misma altura, si ambas rendijas son del mismo tamaño y la arena se vierte desde una posición elevada y centrada sobre ellas.



La luz que alumbra a través de dos rendijas estrechas formará un patrón de franjas sobre la pantalla debido a la interferencia entre las ondas de luz que salen de las rendijas. Esto solo ocurrirá, por supuesto, si la fuente de luz es «monocromática» (produce luz de una sola longitud de onda).

Ahora llega la parte interesante: repetir el truco con átomos. Un instrumento especial (que llamaremos pistola atómica, a falta de un nombre mejor) lanza un haz de átomos contra una pantalla provista de dos rendijas adecuadas[1]. Y, por otro lado, la segunda pantalla está tratada con un revestimiento que crea una manchita clara cada vez que un átomo choca contra ella.



Como es natural, los granos de arena no se comportan como ondas, y forman dos montículos debajo de las rendijas.

Desde luego no es necesario decir que los átomos son entidades increíblemente minúsculas y que, por tanto, está claro que deberían comportarse de forma similar a la arena, y no como ondas en propagación, capaces de abarcar ambas rendijas al mismo tiempo.

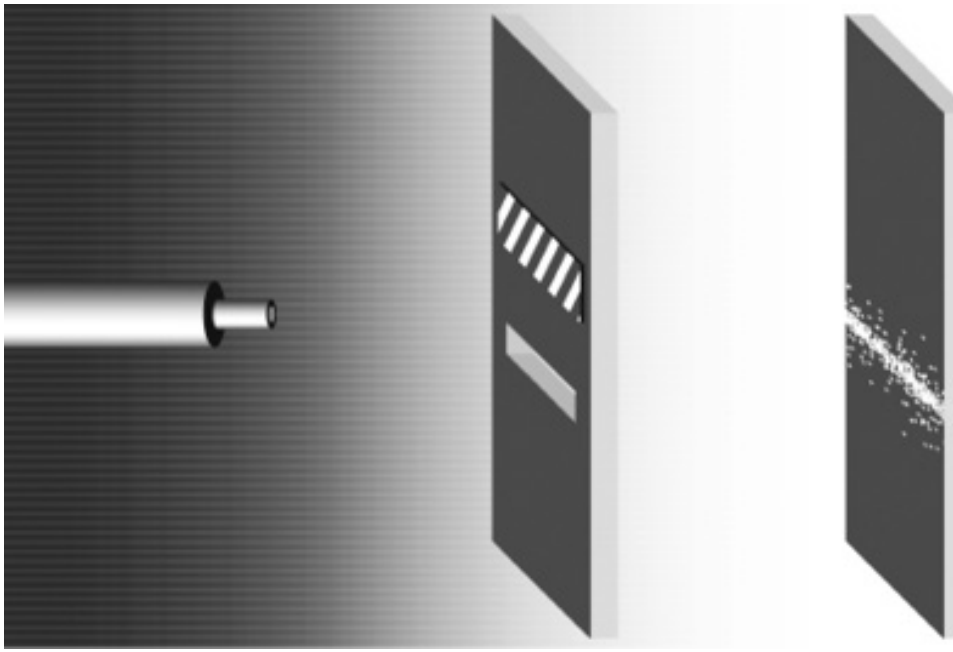
En primer lugar practicamos el experimento con una sola rendija abierta. No es de extrañar que obtengamos sobre la pantalla del fondo un estarcido de manchas claras situadas justo detrás de la rendija abierta. La ligera dispersión de este estarcido de manchas podría extrañarnos si ya sabemos algo sobre el comportamiento de las ondas, puesto que eso es lo que le ocurre a una onda cuando atraviesa una rendija estrecha (difracción). Sin embargo, podemos convencernos con rapidez de que aún no hay motivo para preocuparse demasiado, puesto que algunos de los átomos pudieron desviarse al rozar los bordes de la rendija, en lugar de atravesarla limpiamente, y eso explicaría la difusión.

A continuación abrimos la segunda rendija y esperamos a que se formen las manchas sobre la pantalla. Si le pido ahora que prediga la distribución que tendrán las manchas claras que se formen, naturalmente dirá usted que se parecerán a los dos montones de arena. Es decir, que detrás de cada rendija se formará una

concentración de manchas que dará lugar a dos acumulaciones claras bien diferenciadas, más claras por el centro y que se desvanecen progresivamente hacia los bodes a medida que los «impactos» de átomos se vuelven más escasos. El punto central situado entre ambas manchas claras será oscuro, porque se corresponderá con una zona de la pantalla igualmente difícil de alcanzar para los átomos que hayan conseguido pasar a través de cualquiera de las dos rendijas.

Pues bien, sorpresa, sorpresa: los átomos no se comportan de ese modo. Lo que veremos será un patrón de interferencia de franjas claras y oscuras como el que obtuvimos con la luz. Lo crea o no, la parte más clara de la pantalla ocupará la zona central ¡donde no esperábamos que lograra incidir ningún átomo!

Podríamos intentar explicar cómo se formó el patrón del siguiente modo. Aunque un átomo sea una partícula minúscula bien localizada (al fin y al cabo, cada átomo impacta contra la pantalla en un único punto) da la impresión de que la corriente de átomos consipiró de alguna manera para comportarse de un modo parecido a una onda. Chocan contra la primera pantalla y los que consiguen cruzarla a través de las rendijas «interfieren» en la trayectoria de los demás, mediante fuerzas atómicas, de un modo que emula con exactitud el patrón que se produce cuando se juntan los valles y las crestas de dos ondas. Puede que los átomos choquen entre sí de una forma coordinada especial que haga que se guíen los unos a los otros hasta la pantalla. No cabe ninguna duda, cabría razonar, de que los átomos no son como ondas que se propagan (como las ondas lumínicas, o las olas en el agua, o las ondas de sonido); pero tal vez tampoco debamos esperar que se comporten igual que los granos de arena.



Ahora repetiremos el experimento con átomos. Al tapar una de las rendijas, los átomos solo pasan a través de la que queda abierta. La distribución de puntos indica dónde han aterrizado los átomos. Aunque esta pequeña difusión se debe en realidad a una propiedad de las ondas llamada difracción, aún podría aducirse que los átomos se comportan como partículas y que el resultado obtenido no difiere del exhibido por los montículos de arena.

Y aquí es donde se desmorona ese argumento tranquilizador. Para empezar, se ve que el patrón de franjas sobre la pantalla del fondo guarda cierta relación con la manera en que dos ondas interfieren. Tal como sucede con las ondas normales, sus detalles dependen de la anchura de las rendijas, la separación entre ellas y la distancia hasta la pantalla del fondo.

Esto no prueba de por sí que los átomos se estén comportando como ondas. Sin embargo, el experimento de la doble rendija no se ha realizado tan solo con muchos átomos, sino que también se ha ejecutado con átomos individuales, ¡lanzando solo uno cada vez! Es decir, solo cuando se ve la claridad en la pantalla del fondo que indica la llegada de un átomo en cuestión, se lanza el siguiente, y así sucesivamente, de manera que en cada ocasión solo hay un átomo viajando a través del dispositivo. Cada átomo que consigue cruzar las rendijas deja una minúscula mancha de luz localizada en algún lugar de la pantalla. En la práctica, la mayoría de los átomos se queda bloqueada en la primera pantalla, en lugar de pasar a través de las estrechas rendijas, así que solo nos interesan aquellos que logran

rebasarlas.

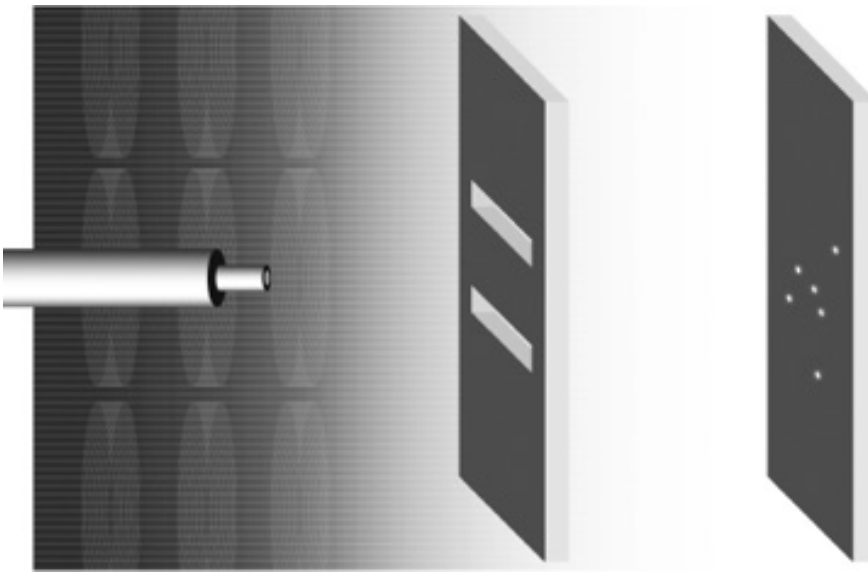
Lo que vemos es bastante increíble. Progresivamente van apareciendo las manchas en la pantalla y poco a poco se forman las bandas claras características de un patrón de interferencia allí donde hay una alta densidad de manchas. Entre esas bandas hay regiones oscuras en las que aterrizan muy pocos o ningún átomo.

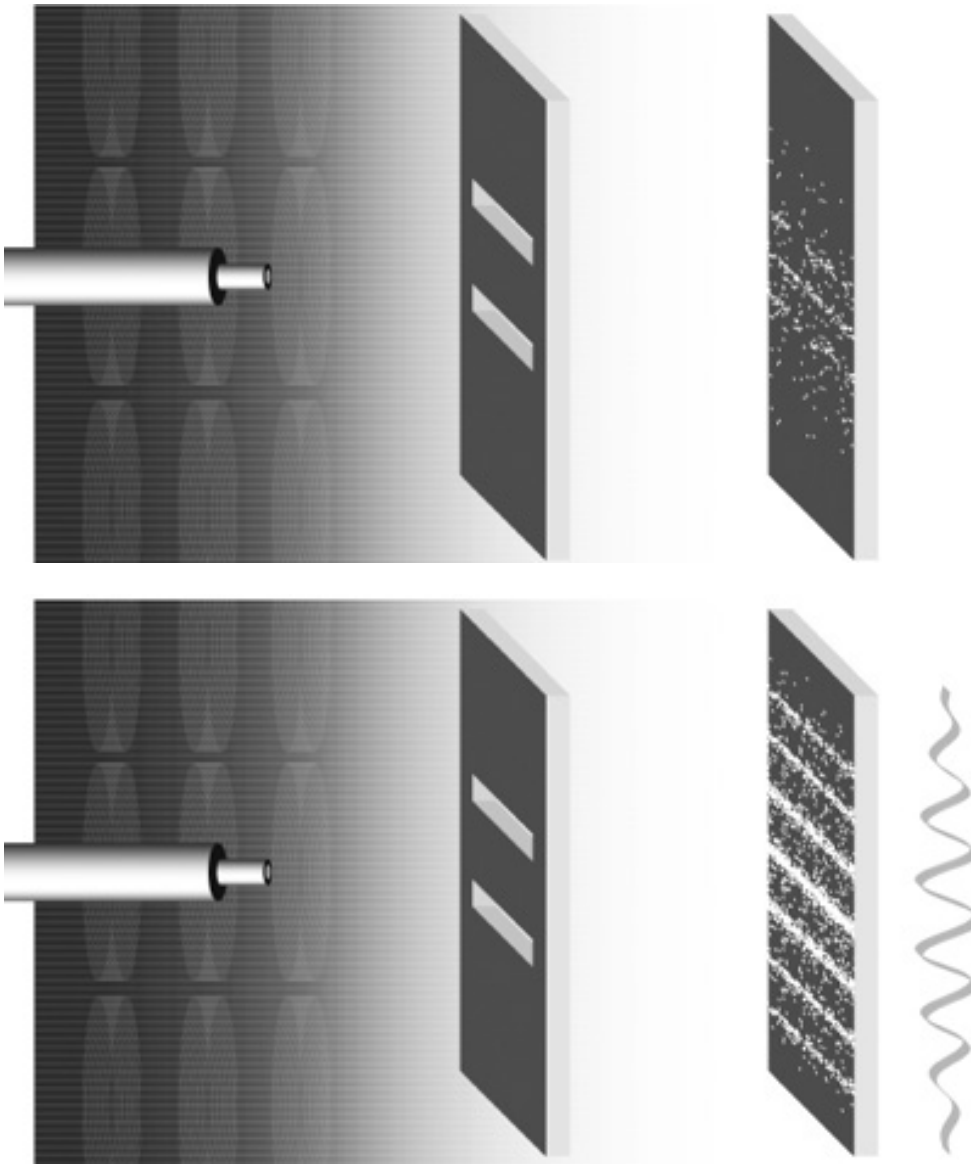
Parece que ya no se sostiene la explicación de que los átomos que salen por una rendija chocan con los átomos que salen por la otra. El patrón de interferencia ya no puede surgir como resultado de un comportamiento colectivo. Entonces ¿qué es lo que pasa? Lo más espectacular de este resultado es que hay partes de la pantalla del fondo a las que llegaban los átomos cuando solo estaba abierta una rendija. Al abrir la segunda rendija, los átomos cuentan con otra vía de acceso, así que cabría esperar que aumentaran las posibilidades de que los átomos lleguen a esas partes. Sin embargo, cuando ambas rendijas están abiertas, tampoco llega a ellas ningún átomo. De alguna manera, si cada átomo atraviesa verdaderamente una sola de las rendijas, tiene que saber de antemano si la otra está abierta o no ¡y actuar en consecuencia!

Recapitulemos: cada átomo que dispara la pistola sale de ella en forma de partícula microscópica «localizada» y llega a la segunda pantalla también como partícula, tal como evidencia el minúsculo destello de luz que aparece a su llegada. Pero cuando se topa con las dos rendijas, en el medio pasa algo misterioso, algo parecido al comportamiento de una onda en propagación que se divide en dos componentes, cada una de las cuales atraviesa una de las rendijas e interfiere con la otra cuando están al otro lado. ¿De qué otra manera racional podría lograrse que el átomo supiera que hay abiertas dos rendijas a la vez?

Cuando hacía trucos de magia en las fiestas de cumpleaños de mis hijos (ya son muy mayores para pasar tanto bochorno), siempre había unos cuantos listillos que afirmaban saber cómo funcionaba el truco. Insistían en mirarme las mangas, buscar detrás de la pantalla y debajo de la mesa para pillarme. Ese comportamiento por lo común fastidioso es el que se fomenta en los experimentos científicos. Así que comprobemos las mangas de la naturaleza escondidos detrás de una de las rendijas para ver qué hacen en realidad los átomos. Podemos conseguirlo poniendo un detector de átomos detrás de una de las rendijas, de manera que absorba cualquier átomo que pase a través de

ella. Comprobaremos que atrapa un átomo de vez en cuando. Nunca pillará solo un trozo de un átomo. Atrapar fragmentos demostraría al menos que «el resto del átomo» pasó a través de la otra rendija. A veces, por supuesto, pasará algún átomo por la otra rendija, tal como revelará la aparición de un punto de luz sobre la pantalla. Como es natural, la acumulación de muchos puntos en la pantalla no tendrá ahora el aspecto de un patrón de interferencia, puesto que los átomos solo están atravesando una de las rendijas, tal como ocurría en la primera parte del experimento cuando solo estaba abierta una de ellas. Ahora, en lugar de cerrar la segunda rendija, hemos atrapado con el detector todos los átomos que habrían pasado por ella.





Derecha: Con ambas rendijas abiertas, se disparan átomos de uno en uno. Hasta que se ve aparecer un punto en la pantalla del fondo no se lanza el siguiente átomo. Cada átomo parece caer en un lugar aleatorio de la pantalla y, de entrada, no se forma ningún patrón claro. Poco a poco, a medida que aumenta el número de puntos, va apareciendo un patrón de interferencia en forma de bandas. ¿Qué está pasando? ¿Cómo pueden conspirar los átomos para crear el patrón resultante de un comportamiento típico de ondas? Parece que cada átomo tiene más posibilidades de caer en ciertas regiones que en otras. Está claro que en la propagación de un solo átomo interviene algún proceso parecido al de las ondas, pero el patrón de interferencia solo aparece cuando una sola onda atraviesa a la vez *ambas rendijas*. ¿Cómo es posible que un átomo minúsculo, que sale de la pistola en forma de partícula localizada e impacta contra la pantalla en un punto definido, pase a través de ambas rendijas al mismo tiempo?

Ahora debería empezar a dudar usted de la veracidad de lo que estoy diciendo. Una cosa es que por arte de magia los átomos se transformen de partículas diminutas en ondas en propagación cada vez que se encuentran con dos rutas posibles por las que atravesar la primera pantalla. Puede que se produzca algún proceso físico que todavía no ha explicado nadie. Y otra cosa completamente distinta es insinuar que el átomo se da cuenta de alguna manera de que hay un detector oculto tras una de las rendijas dispuesto a atraparlo en el momento en que adopte el estado de onda en propagación. Es como si supiera de antemano que estamos al acecho para tenderle una emboscada y ¡tuviera la picardía de mantener su naturaleza de partícula!

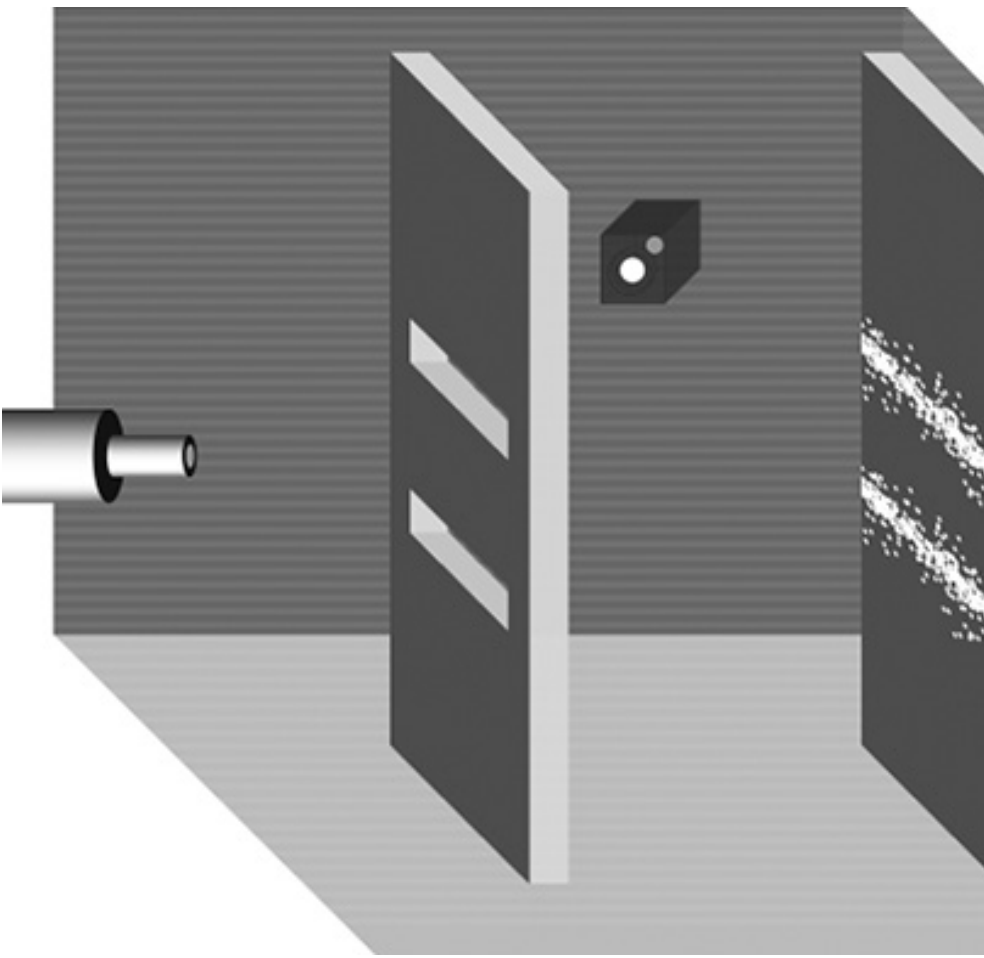
Pero lo cierto es que ni siquiera así hemos añadido nada nuevo al experimento inicial. Supuestamente, el detector tiene de alguna manera la capacidad de convertir un átomo con forma de onda en propagación en una partícula localizada tal como hace la pantalla del fondo cada vez que recibe un átomo.

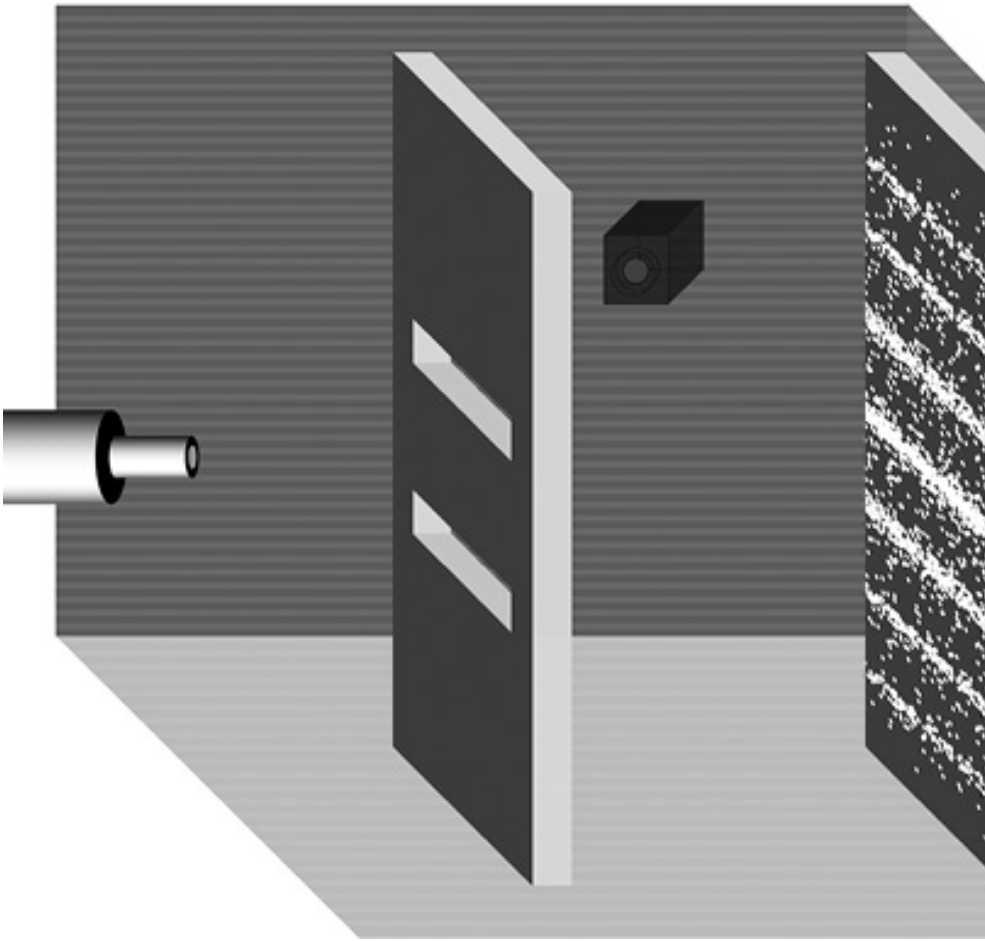
El detector se puede colocar de un modo menos invasivo, de tal modo que logre captar una «señal» cuando un átomo atraviese esa rendija en su trayectoria hacia la pantalla. Si no detecta ningún átomo pero aparece un impacto en la pantalla del fondo, entonces el átomo pasó por la otra rendija[2]. Por supuesto, estoy simplificando mucho; más adelante veremos que el detector no puede captar una señal sin ser muy invasivo.

Por tanto, tal vez piense usted que al fin tenemos la prueba de que cada átomo pasa en realidad a través de una sola de las rendijas, tal como tenemos todo el derecho a esperar, y no simultáneamente por las dos, como una onda en propagación. Pero antes de que nos invada la complacencia, echemos una ojeada a la pantalla. Cuando una cantidad suficiente de átomos induce una señal en el detector al pasar a través de la rendija supervisada y, por tanto, nos hemos convencido de que la mitad pasó por una rendija y la otra mitad cruzó por la otra, nos encontraremos con que ¡el patrón de interferencia ha desaparecido! En su lugar no habrá más que dos manchas claras debidas a la concentración de un montón de átomos detrás de cada rendija. Los átomos se están comportando ahora como partículas, igual que los granos de arena. Es como si cada átomo se comportara como una onda cuando se encuentra ante una rendija, a menos que lo estemos espiando, en cuyo caso permanece como minúscula partícula inocente.

De locos, ¿no?

Desde luego puede que sea usted una persona muy exigente y que ni siquiera ahora considere todo esto demasiado sorprendente. Tal vez la mera presencia de un gran detector en el camino de los átomos altere de algún modo su extraño y frágil comportamiento. Pero parece que el problema no es ese, porque al apagar el detector (y, por tanto, cuando no tenemos ni idea de qué rendija atravesó el átomo) vuelve a aparecer el patrón de interferencia. Solo cuando se está observando el átomo, se mantiene como partícula en todo momento. Es evidente que el acto de observar el átomo es determinante.





Izquierda arriba: Al colocar un detector para saber por qué rendija pasa cada átomo, el patrón de interferencia desaparece. Es como si los átomos no quisieran que los pillaran en el momento en que toman ambos caminos a la vez, y solo pasaran por una rendija u otra. En la pantalla adyacente a las rendijas se forman dos bandas como resultado del comportamiento de partícula, algo parecido a lo que ocurre con la arena.

Izquierda abajo: Al apagar el detector ya no tenemos ninguna información sobre qué ruta sigue cada átomo. Ahora que su secreto está bien guardado, los átomos vuelven a adoptar su misterioso comportamiento de ondas y ¡aparece de nuevo el patrón de interferencia!

Por si todo esto no bastara, queda una última posibilidad en este truco. Aunque admitamos que los átomos son cositas astutas, ¡quizá no lo sean lo suficiente! ¿Qué tal si dejamos que pasen por las rendijas uno a uno, por supuesto, haciendo lo que quiera que hagan los átomos para crear el patrón de interferencia en la pantalla del fondo? Pero esta vez nos aseguraremos de pillarlos *in fraganti*. Los experimentos denominados de «opción retardada» permiten instalar un detector y

activarlo tan solo después de que el átomo haya atravesado las rendijas. Podemos asegurarnos de ello controlando la energía de los átomos lanzados y calculando cuánto tardará cualquier átomo en alcanzar la primera pantalla.

Esta clase de experimento de opción retardada se ha realizado, de hecho, usando fotones en lugar de átomos, pero el razonamiento sigue siendo el mismo. La electrónica moderna de alta velocidad permite acercar el detector lo bastante a una de las rendijas como para que capte si el átomo ha pasado por ella, pero no se debe activar hasta que el átomo, que se comporta como una onda en propagación, haya salido por las dos rendijas, pero hay que encenderlo antes de que el átomo llegue al detector. Seguro que entonces será demasiado tarde para que el átomo decida comportarse de repente como una partícula localizada que solo ha pasado a través de una de las rendijas. Aparentemente, no. En estos experimentos se comprueba, sin embargo, que el patrón de interferencia desaparece.

¿Qué está pasando? Parece magia, y sospecho que probablemente usted no me crea. Bueno, los físicos han dedicado muchos años a encontrar una explicación lógica para lo observado. Aquí es donde debo tener cuidado para matizar a qué me refiero con «explicación lógica». Uso esta expresión en el sentido laxo que tiene en la vida cotidiana, cuando significa una explicación que se sitúa con comodidad dentro de los límites de lo que consideraríamos racional, razonable y sensato, y que no contradice o entra en conflicto con el comportamiento de otros fenómenos que experimentamos de manera más directa.

De hecho, la mecánica cuántica nos brinda una explicación perfectamente lógica del truco de las dos rendijas. Pero solo sirve para explicar lo observado y no lo que ocurre cuando no estamos mirando. Pero, como lo único que tenemos para avanzar es lo que podemos ver y medir, tal vez no tenga sentido plantearse nada más. ¿Cómo se valora la legitimidad o la verdad de la explicación de un fenómeno que no se puede comprobar jamás, ni tan siquiera en principio? En cuanto lo intentamos, alteramos el resultado.

Quizá le esté pidiendo demasiado a la palabra «lógico». Al fin y al cabo, hay muchos ejemplos de la vida cotidiana en los que podría considerarse el comportamiento de algo como ilógico o irracional. Lo único que significa eso es que dicho comportamiento fue, en cierto modo, inesperado. Con el tiempo deberíamos ser capaces, en

principio, de analizar el comportamiento en términos de causa y efecto; que ocurre esto y, por tanto, ocurre lo otro como consecuencia, y así sucesivamente. No importa lo compleja que sea la cadena de sucesos que conduzca a cierto comportamiento, ni tan siquiera que seamos capaces de entender por completo cada paso. Lo que importa es que, en cierta manera, lo observado se puede explicar. Puede que estén actuando nuevos procesos, nuevas fuerzas o propiedades de la naturaleza que aún no se han comprendido o ni siquiera descubierto. Lo único que importa es que podemos usar la lógica, por muy enrevesada que sea, para explicar lo que posiblemente está sucediendo.

Los físicos se han visto obligados a admitir que, en el caso del truco de la doble rendija, no existe ninguna salida racional. Podemos explicar lo que vemos, pero no su porqué. Por muy extrañas que nos parezcan las predicciones de la mecánica cuántica, debemos hacer hincapié en que lo raro no es la teoría (una invención humana), sino que es la propia naturaleza la que insiste en esa extraña realidad a una escala microscópica.

Hace unos años leí que los estadounidenses habían elegido por votación el poema de Robert Frost titulado «El camino que no tomé» como el más popular de todos los tiempos. Frost, considerado desde hace mucho tiempo el poeta estadounidense más apreciado del siglo XX, pasó la mayor parte de su vida en Nueva Inglaterra, donde escribió sobre todo acerca de la vida rural en el campo de New Hampshire. Un precioso ejemplo lo constituye el poema un tanto melancólico «El camino que no tomé». En él también se habla (aunque de un modo poco intencionado por parte de Frost) sobre la mismísima esencia de lo que tiene que ser el mundo cuántico:

En un bosque amarillo divergían dos senderos
pero era imposible elegirlos los dos
por ser yo solo uno, y de pie con esmero
contemplé la apariencia que mostraba el primero
hasta donde torcía en la vegetación.

Pero opté por el otro, parecía perfecto,
pues quizá a su favor el segundo ofrecía
hierba espesa y jugosa que pedía recorrerlo
aunque el uso anterior por otros viajeros

casi igual de gastadas mantuviera ambas vías,

y las dos se mostraran en aquella mañana
tapizadas de hojas no manchadas de negro.
¡Andaré la que hoy dejo en futura jornada!
Pero todo camino hacia otro traslada,
y dudaba yo entonces de un posible regreso.

Contaré todo esto con sonoro suspiro
al cabo de las eras, quién sabe en qué lugar:
en un bosque amarillo divergían dos caminos
de los cuales tomé el menos concurrido
y esa opción me marcó ya todo lo demás.

Aunque con frecuencia nos sobren los reproches sobre las elecciones que tomamos en la vida, la mecánica cuántica nos revela una realidad muy distinta a un nivel subatómico. En un primer contacto, el mundo cuántico quizá nos parezca increíble al interpretarlo de acuerdo con las ideas preconcebidas de las experiencias cotidianas, eso que llamamos el sentido común. Pero el hecho de que los objetos cuánticos se comportan de manera extraña está fuera de toda duda. Un único átomo puede recorrer las dos sendas del bosque amarillo de Frost... los átomos no tienen nada que reprocharse; pueden tener todas las experiencias posibles simultáneamente. Lo cierto es que siguen el consejo del gran jugador estadounidense de béisbol Yogi Berra, quien dijo: «Si te encuentras con una encrucijada en el camino, tómala».

El esquiador cuántico. La verdadera rareza del comportamiento de las partículas cuánticas se hace patente al compararlas con un esquiador que, obligado a rodear un árbol interpuesto en su camino, opta por bordearlo por los dos lados al mismo tiempo. Está claro que en nuestro mundo cotidiano de árboles y esquiadores esto se interpretaría como alguna clase de tomadura de pelo. Pero en el mundo cuántico eso es lo que sucede en realidad.

Lo que hemos visto en este capítulo no es más que un ejemplo de la manera en que se manifiesta el fenómeno cuántico conocido como *superposición*. Podría haber descrito cualquiera de los muchos «trucos» igual de inexplicables que se basan en la superposición cuántica, junto con otros muchos rasgos fascinantes que son únicos de la esfera cuántica. Espero que este capítulo no le haya quitado las ganas de seguir con el apasionante viaje que tenemos por delante.

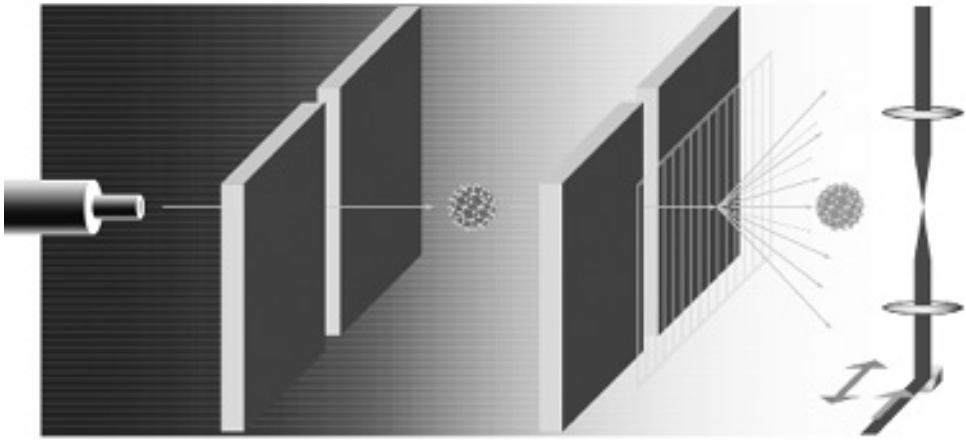
Esferas de fulereno y el experimento de la doble rendija

Markus Arndt y Anton Zeilinger, Departamento de Física de la Universidad de Viena

Solemos imaginar un cuerpo físico como un objeto localizado, mientras que la noción de onda está íntimamente vinculada a algo extendido y deslocalizado. En contra de esta concepción habitual, la física cuántica afirma que ambas nociones, aunque parezcan contradictorias, se pueden

aplicar a un único objeto en un único experimento.

En tiempos recientes hemos perfeccionado ese experimento con grandes moléculas de carbono llamadas esferas de fulereno. Cada una de estas moléculas, conocidas como C60 y C70, contiene 60 o 70 átomos de carbono cuya disposición forma las réplicas más pequeñas que se conocen de un balón de fútbol, con un diámetro que no supera una millonésima de milímetro. A pesar de su minúsculo tamaño, estas moléculas constituyen los objetos más masivos que se han empleado jamás para demostrar hasta la fecha la naturaleza ondulatoria de la materia.



El experimento se efectúa del siguiente modo. La fuente de moléculas es un simple horno lleno de carbono pulverizado. Las moléculas salen por un orificio, como cuando el vapor de agua se escapa por la boca de una tetera. Después atraviesan dos rendijas de colimación en dirección a un detector láser de alta resolución que se puede desplazar para registrar la distribución espacial del haz molecular.

Durante el recorrido hacia el detector, las moléculas pueden hallarse ante tres posibilidades distintas: o bien ningún obstáculo en absoluto, o una rendija muy estrecha o una rejilla muy fina, que es una membrana con varias rendijas.

El perfil del haz molecular en el primer caso, el «vacío», es un único pico estrecho que concuerda a la perfección con nuestras ingenuas expectativas, suponiendo que cada molécula pueda considerarse como una pelota clásica en vuelo libre.

Sin embargo, la primera rareza ocurre en el segundo caso: si situamos una única rendija muy estrecha (de 70 nanómetros –millonésimas de milímetro– de ancho) entre la fuente emisora y el detector, obtenemos un perfil en la pantalla que difiere del caso en el que no había nada. Apreciamos un intenso ensanchamiento (en lugar del estrechamiento que sería de esperar si las moléculas no fueran más que meros balones de fútbol de tamaño reducido. Esta es una consecuencia de la difracción, una propiedad de las ondas.

La situación se vuelve aún más extraña cuando sustituimos la estrecha rendija por una rejilla. Esta estructura consiste en varias aberturas, ligeramente más estrechas (en concreto 50 nanómetros) que la primera rendija. Las rendijas se encuentran a intervalos regulares (unos 50 nanómetros de separación entre ellas). Si las moléculas fueran meras partículas lo esperable sería un aumento de la señal en todas las regiones de la pantalla. Pero, para sorpresa de nuestro sentido común, ahora nos encontramos con que hay lugares donde difícilmente se detecta siquiera una molécula.

La apertura de dos o más vías en la pared, en lugar de solo una, reduce el número de moléculas detectadas en determinados sitios. Se trata de algo muy contrario a la intuición; no se puede explicar con el modelo de las pelotas clásicas que siguen trayectorias bien definidas,

sino que concuerda a la perfección con un modelo basado en que las moléculas individuales tienen naturaleza ondulatoria. Aquí se pierde el concepto de «trayectoria», y las moléculas logran explorar de forma simultánea un espacio extenso que es varios órdenes de magnitud mayor que la molécula en sí, lo que da lugar a la interferencia cuántica.

Es importante constatar que las señales captadas por el detector están bien localizadas y que el lugar donde impacta cada molécula individual es absolutamente aleatorio, hasta donde puede afirmarse. Y sin embargo, el extraño patrón ondulatorio se va formando a medida que impactan cada vez más y más moléculas en el detector.

1. En realidad las rendijas tienen que ser estrechas y estar muy próximas entre sí. Estos experimentos se efectuaron en la década de 1990 con una lámina de oro a modo de pantalla y con rendijas del orden de un solo micrómetro (una milésima de milímetro) de ancho.

2. Parto del supuesto de que el detector tiene un 100% de efectividad y que se activará siempre que un átomo pase por la rendija que está vigilando.

2. Orígenes

Muchos libros de divulgación científica, e incluso manuales de física, tienden a difundir dos mitos relacionados con el origen de la mecánica cuántica. Desde luego, las exposiciones demasiado simplistas del desarrollo de la ciencia son bastante comunes, de hecho necesarias, en la enseñanza de la misma. La mayor parte del avance científico es fruto de un proceso enmarañado y lento, y su historia solo se puede contar de forma pedagógica, y no cronológica, en retrospectiva y después de haber desentrañado en su totalidad una teoría o un fenómeno. Esto requiere la destilación de ciertos acontecimientos y personalidades del conjunto, a menudo debido al impecable paquete que queda cuando se reparten los premios Nobel.

¿Y cuáles son esos dos mitos?

El primero es el relato más que simplificado e impreciso del estado de la física a finales del siglo XIX. Esa historia cuenta que los científicos de la época tenían la sensación de que habían finiquitado y explicado casi toda la física; que todos los fenómenos físicos podían entenderse en su totalidad dentro de una cosmovisión basada en el doble pilar de la mecánica y las leyes del movimiento de Newton y la teoría electromagnética recién culminada por James Maxwell. Solo faltaba poner el punto y el palote a un puñado de íes y de tes.

El segundo mito es que el físico alemán Max Planck propuso una nueva fórmula revolucionaria para describir un resultado experimental en el campo de la termodinámica[3] que no podía reproducirse mediante la teoría imperante, y que de inmediato nació la revolución cuántica.

Cómo empezó todo

Aunque este libro no trata sobre la historia de la mecánica cuántica ni sobre las figuras implicadas en su desarrollo, en este capítulo contaré la historia de cómo y por qué surgió todo. Por tanto, aunque no pretendo detenerme demasiado en la situación de la física antes de la mecánica cuántica, es interesante intentar concretar con exactitud

cuándo y cómo empezó todo. Con respecto al primer mito, lo cierto es que en los tiempos en que el siglo XIX llegaba a su fin, había tantas cuestiones que resolver y tantos fenómenos extraños que explicar que algo tenía que saltar. Físicos y químicos ni siquiera lograban ponerse de acuerdo en si la materia se componía en última instancia de átomos indivisibles, o en si era continua e infinitamente divisible. Tampoco eran capaces de decidir si la mecánica de Newton (ecuaciones que regían la interacción y el movimiento de los objetos macroscópicos[4] sometidos al influjo de fuerzas) podría o no expresarse en términos de la teoría más fundamental del electromagnetismo de Maxwell.

Y por si estas cuestiones esenciales no fueran suficientes, otros campos bastante recientes de la física, como la termodinámica y la mecánica estadística[5], estaban generando un encendido debate. En el terreno experimental, estaban los fenómenos sin explicación del efecto fotoeléctrico y de la radiación del cuerpo negro (los cuales describiré en breve), y nadie sabía cómo interpretar el significado de los patrones de «líneas espectrales» en la luz emitida por ciertos elementos. A todo ello hay que añadir el entusiasmo mundial que despertó el descubrimiento de los misteriosos fenómenos de los rayos X (1895) y la radiactividad (1896), por no hablar del electrón (1897). En términos generales, la física estaba hecha un embrollo monumental.

El segundo mito es que a finales del siglo XIX Max Planck revolucionó la ciencia al plantear que la energía llegaba en paquetes (llamados *cuantos),* un concepto que se vio obligado a introducir para entender cómo irradian calor los objetos calientes, y que al instante surgió y se puso en marcha la teoría cuántica. En realidad fue un proceso mucho menos claro. De hecho, algunos historiadores de la ciencia niegan que Planck merezca el más mínimo reconocimiento por «descubrir» la teoría cuántica[6]. A diferencia de muchas otras grandes revoluciones en ciencia, la mecánica cuántica no se debió al golpe de genialidad de un solo hombre. Newton tuvo su momento eureka al ver caer una manzana de un árbol en el huerto de su madre y descubrió su conocida ley de la gravitación (aunque es probable que esta anécdota fuera apócrifa). Y nadie negaría el mérito de Darwin por su teoría de la evolución, ni a Einstein por sus teorías de la relatividad. Sin embargo, el descubrimiento de la mecánica cuántica habría sido simplemente demasiado para una sola persona. Su desarrollo precisó treinta años y la fuerza intelectual combinada de las mentes más

magníficas del mundo.

Antes de continuar, creo que este es un buen lugar para explicar por qué fluctúo entre «teoría cuántica» y «mecánica cuántica». La primera se usa para aludir a la situación reinante durante el periodo de 1900 a 1920, cuando todo se encontraba en una fase de meros postulados y fórmulas que facilitaban el esclarecimiento de algunas cuestiones relacionadas con la naturaleza de la luz y la estructura de los átomos. La auténtica revolución no llegó hasta la década de 1920, y fue así como una visión del mundo completamente nueva (la mecánica cuántica) reemplazó a la «mecánica» newtoniana para describir la estructura subyacente del mundo subatómico.

Pero volvamos al tema de cómo empezó todo y seamos sinceros. Planck fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1918 con la mención: «En reconocimiento a los servicios que ha prestado al avance de la física mediante el descubrimiento de los cuantos de energía». Así que, aunque veremos que otros, como Einstein y Boltzmann, también merecen honores por haber establecido las bases de la teoría cuántica original, la clave de todo está, al fin y al cabo, en el concepto de los «cuantos», que se introdujo por primera vez en la sencilla fórmula de Planck. Entonces, ¿qué hizo exactamente?

Planck creció en Múnich y estudió en Berlín, donde se doctoró con tan solo 21 años. Diez años después ya era catedrático de física, pero habrían de pasar once años más para que propusiera su conocida fórmula en una conferencia ante la Sociedad Alemana de Física de Berlín. La había desarrollado *ad hoc* para resolver un viejo problema relacionado con la manera en que irradian calor algunos objetos. Pero la consideraba un mero truco matemático, más que algo que portara una verdad profunda de la naturaleza en sí[7].

La constante de Planck

De acuerdo con la fórmula de Planck, la energía de los paquetes más pequeños de luz de una frecuencia determinada (un solo cuanto) es igual a la frecuencia multiplicada por cierta constante. Esto se conoce como la constante de Planck, o cuanto de acción de Planck. Se representa mediante el símbolo h y, al igual que la velocidad de la luz c, es una de las constantes universales de la naturaleza.

La relación entre energía y frecuencia es muy simple. Por ejemplo, la frecuencia de la luz violeta, en un extremo del espectro visible, asciende al doble que la de la luz roja, situada en el otro extremo, así que un cuanto de luz violeta tiene el doble de energía que un cuanto de luz roja.

Hoy cualquier estudiante de física conoce la constante de Planck. En unidades de kilogramos, metros y segundos, tiene el valor increíblemente exiguo de $6{,}63 \times 10^{-34}$, y a pesar de ello es uno de los números más importantes en ciencia. Aunque es un número muy bajo, lo crucial es que no vale cero, porque de lo contrario no habría ningún comportamiento cuántico.

Muy a menudo la constante de Planck se combina con otra constante fundamental de la naturaleza, el número pi (π). Este número, tal como se le enseña a cualquier escolar, es la razón que mantiene la circunferencia de un círculo con su diámetro, y aparece sin cesar en las ecuaciones físicas. De hecho, la cantidad $h/2\pi$ aparece tan a menudo en la mecánica cuántica, que se ha inventado un nuevo símbolo para describirla: la llamada h barra (pronunciado «hache barra»).

Radiación del cuerpo negro

El calor del Sol, o la radiación térmica, que sentimos en la cara un día de verano ha viajado por el vacío del espacio antes de llegar hasta nosotros. Lo que usted tal vez no sepa es que esta radiación ha cubierto la distancia que separa el Sol de la Tierra en el mismo tiempo (unos ocho minutos) que tardó en llegarnos la luz del Sol. La razón de ello estriba en que tanto la radiación térmica como la radiación visible del Sol son formas distintas de ondas electromagnéticas. Lo único que las diferencia es su longitud de onda. Las oscilaciones correspondientes a la luz visible están más apretadas entre sí (longitudes de onda más cortas y, por tanto, frecuencia más alta) que

las de las ondas que sentimos como calor. El Sol también emite luz ultravioleta de una longitud de onda aún más corta y que queda fuera del espectro visible.

Pero el Sol no es el único que emite radiación electromagnética. Todos los objetos lo hacen, y a lo largo de todo el rango de frecuencias del espectro. La distribución de energía emitida en función de la frecuencia depende de la temperatura del cuerpo. Si un sólido está lo bastante caliente, brillará con luz visible, pero a medida que se enfríe irá perdiendo brillo conforme vaya dominando la radiación de una longitud de onda más larga (situada fuera de la parte visible del espectro). Esto no significa que deje de emitir luz visible, sino que la intensidad de esa luz será demasiado débil para que nosotros podamos captarla. Por supuesto, toda la materia también absorbe y refleja la radiación que incide sobre ella. El color de todo lo que vemos viene definido por las longitudes de onda que cada objeto absorbe y refleja.

Los físicos de la segunda mitad del siglo XIX estaban muy interesados en saber de qué manera emite radiación un tipo muy particular de objeto caliente conocido como «cuerpo negro». Los cuerpos negros se llaman así porque absorben radiación con tanta perfección que no reflejan nada de luz ni de calor. Por supuesto, un cuerpo negro tiene que liberarse de alguna manera de toda la energía que absorbe (porque, en caso contrario, ¡alcanzaría una temperatura infinita!). Por tanto, irradia su calor en todas las longitudes de onda posibles. La longitud de onda en que la radiación es más intensa depende, por supuesto, de la temperatura del cuerpo negro.

En casi todos los manuales de física encontraremos una gráfica que muestra varias curvas (llamadas espectros) obtenidas al representar la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro frente a la longitud de onda de la radiación[8] a diversas temperaturas. Todas estas curvas comienzan con una intensidad baja para las longitudes de onda muy cortas, ascienden hasta un máximo, y luego caen de nuevo a las longitudes de onda más largas. La forma exacta de estas curvas era lo que despertaba el interés de físicos como Planck.

En la investigación científica ocurre con frecuencia que una vez que están disponibles nuevos datos experimentales, corresponde a las teorías explicarlos. Y eso mismo fue lo que sucedió con los espectros del cuerpo negro. En 1896, un colega de Planck, Wilhelm Wien, desarrolló una fórmula que le permitió trazar una curva que encajaba a la perfección con los precisos datos experimentales que él mismo

había obtenido para el extremo de la longitud de onda más corta, pero que no concordaba muy bien con las longitudes de onda más largas.

Hacia la misma época, uno de los grandes físicos del siglo XIX, el inglés lord Rayleigh, propuso una fórmula distinta basada en una deducción teórica más rigurosa que la ecuación de Wien. Sin embargo, aquella teoría planteaba el problema opuesto: encajaba perfectamente con los datos de la parte de la curva correspondiente a la longitud de onda más larga, pero fallaba por completo en el otro extremo, en la radiación de longitudes de onda más cortas que las de la luz visible. Este error de la teoría de Rayleigh se manifestaba en una curva que predecía que la radiación térmica emitida por un cuerpo negro debía aumentar de intensidad a medida que se acortara la longitud de onda, y dispararse hasta el infinito en la región ultravioleta del espectro. Este problema acabaría conociéndose como «catástrofe ultravioleta»[9].

A pesar de lo que se cuenta en numerosos relatos muy extendidos, Max Planck se interesó por la radiación del cuerpo negro, no debido al error de la fórmula de Ray- leigh, sino para dotar a la fórmula de Wien de una base teórica firme. Al fracaso de sus primeros intentos siguió un periodo de trabajo muy intenso, tras el cual llegó, de manera provisional y con muchas reticencias, a una fórmula nueva y bastante diferente.

Planck era conservador en sus concepciones y, en la primera etapa de su carrera, ni siquiera creía en la existencia de los átomos, defendida por contemporáneos suyos como Ludwig Boltzmann. Planck creía que no tardaría en demostrarse que la materia era continua, en el sentido de que no estaba compuesta en última instancia por «elementos constitutivos» esenciales, sino que podría dividirse hasta el infinito y seguir manteniendo su esencia. Sin embargo, para hallar una solución para el problema de la radiación del cuerpo negro, basó su teoría en las ideas de Boltzmann. Presentó sus resultados en una conferencia ante la Sociedad Alemana de Física el 14 de diciembre de 1900, una fecha considerada por muchos el día en que nació la física cuántica.

Su planteamiento fue el siguiente: si un cuerpo negro está compuesto en última instancia por átomos en vibración (aunque debemos remarcar que Planck los denominó «osciladores» sin más: vagas entidades elementales que oscilan, o vibran, con una frecuencia que depende de la temperatura del cuerpo), entonces la energía que emiten (la radiación del cuerpo negro) depende de su frecuencia de

vibración. Esto significaría que cuanto mayor sea su frecuencia, más energía emitirán. Pero el punto clave era que esos osciladores solo tendrían ciertos modos de vibración, y que sus frecuencias tendrían que aumentar a saltos fijos en lugar de hacerlo con suavidad[10]. Por tanto, la energía emitida solo puede tener determinados valores, puesto que no se permitirían todas las energías posibles. Es decir, la energía llegaría en paquetes fijos, o «cuantos». Esto suponía una desviación extrema de la teoría electromagnética de Maxwell, donde la energía se consideraba un continuo.

Debemos mencionar dos cuestiones aquí. En primer lugar, Planck no se dio cuenta en el primer momento de las implicaciones de su revolucionaria idea. La introducción de los cuantos de energía fue, según sus propias palabras, «un supuesto puramente formal al que en realidad no presté mucha atención más allá del hecho de que debía conducirme, a toda costa, a un resultado satisfactorio». En segundo lugar, Planck no consideraba que toda la energía se componía en última instancia de minúsculos paquetes irreducibles. Eso tuvo que esperar aún cinco años más hasta la intervención del genio de Einstein.

Entonces, para recapitular, la hipótesis de Planck se basaba en dos supuestos: el primero era que la energía de los átomos (u osciladores) solo puede adoptar determinados valores. Estos son meros múltiplos de la frecuencia de vibración de los átomos. El segundo era que la emisión de radiación por parte de un cuerpo negro va asociada a la energía de los átomos que caen desde un valor, o nivel, hasta otro inferior. Cuando la energía desciende, el átomo emite un único cuanto de energía de radiación.

La manera más fácil de imaginarlo consiste en pensar en una pelota que se precipita por un tramo de escaleras y, por tanto, pierde su energía «potencial» a saltos, en lugar de hacerlo de manera continua, como cuando rueda por una pendiente lisa. La diferencia es que los saltos cuánticos entre los distintos niveles de energía atómica se producen de manera instantánea, mientras que la energía potencial de la pelota atraviesa todos los niveles energéticos, puesto que tarda un tiempo breve pero finito en bajar cada escalón.

La trascendencia del trabajo de Planck no se apreció de inmediato. En palabras del historiador Helge Kragh:

> Si en diciembre de 1900 ocurrió una revolución dentro de la física, nadie pareció darse cuenta. Planck no fue una excepción, y la importancia que se le atribuye a su trabajo es

en buena medida una reconstrucción histórica.

Suena bastante duro, pero seguramente sea así. Yo preferiría, sin embargo, ser más generoso y expresarlo de un modo algo distinto. Planck es el verdadero padre fundador de la cuántica; ¡lo que pasa es que en aquel momento no lo sabía! Hicieron falta otros pensadores, más concienzudos y más originales, para que se valorara lo que de verdad había iniciado. En cualquier caso, la aportación de Planck no fue más que un pequeño primer paso. La contribución individual de físicos como Einstein, Bohr, De Broglie, Schrödinger y Heisenberg fue mayor que la de Planck. Solo que Planck fue el primero.

Siempre he sentido cierta debilidad por Max Planck y su difícil vida. Como científico ilustre, opuso resistencia a los nazis en la década de 1930, pero durante la Segunda Guerra Mundial sufrió una gran tragedia personal. Había decidido quedarse en Alemania, donde se opuso abiertamente a muchas de las políticas de los nazis, en particular a la persecución de judíos. Tres de sus hijos habían fallecido ya a edades tempranas, y los dos que le quedaban no sobrevivieron a la guerra. Uno murió combatiendo y el otro fue ejecutado por participar en un atentado fallido contra Hitler. El propio Planck padeció enormes miserias cuando bombardeos aliados destruyeron su casa en 1944. Falleció en 1947 a los 89 años.

Einstein

Si Einstein no hubiera descubierto la teoría de la relatividad, sin duda se habría convertido igualmente en alguien famoso, debido en parte a su relevancia en el desarrollo de la teoría cuántica. Pero como sobresale por encima de cualquier otro físico, excepto de Isaac Newton, parece injusto para todos los demás que se le atribuyan a él las dos grandes revoluciones científicas del siglo XX (la relatividad y la teoría cuántica).

En 1905, cuando contaba tan solo 26 años y trabajaba como empleado en la Oficina de Patentes de Suiza, Einstein publicó cinco artículos teóricos en revistas especializadas de física. Tres de aquellos artículos fueron tan trascendentes que cualquiera de ellos le habría asegurado un lugar en la historia.

El más conocido, y de hecho el más importante, fue el último de los cinco, que dedicó a la relatividad especial; en él demostró que otro

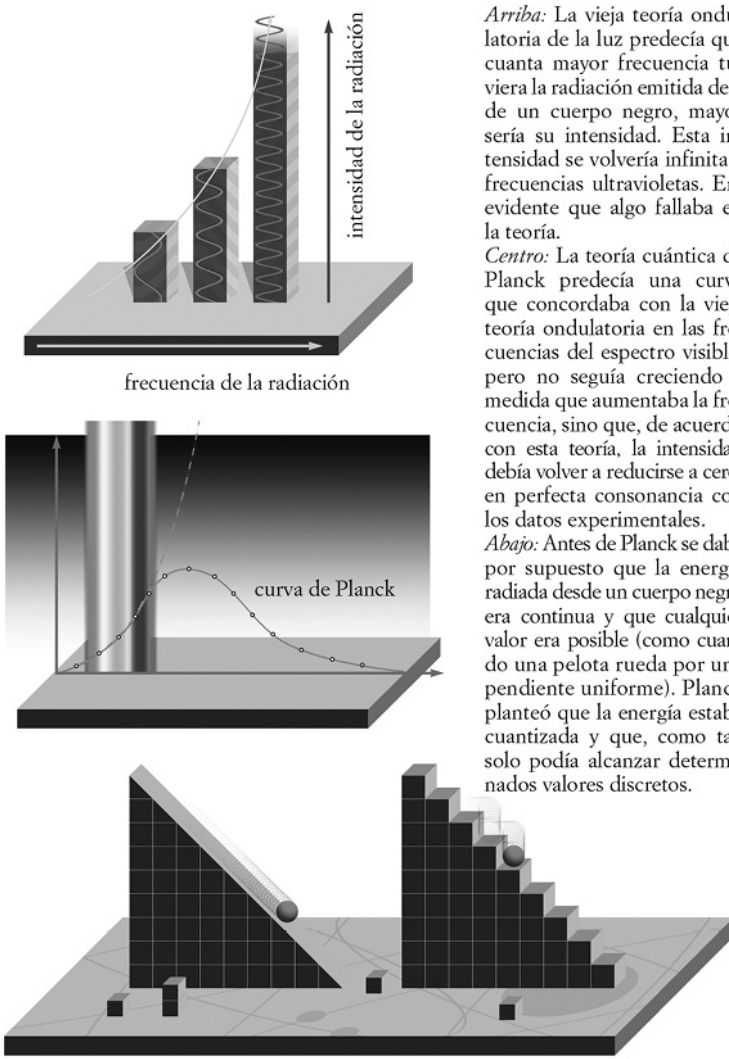
principio fundamental de la física newtoniana, la idea de que el espacio y el tiempo son absolutos, era una ilusión. Para ello partió de dos postulados simples. El primero era que las leyes de la naturaleza se mantienen idénticas con independencia de lo rápido que nos movamos, así que nadie puede afirmar encontrarse realmente en reposo y todo movimiento es relativo. El segundo era que la velocidad de la luz a través del espacio vacío es una constante fundamental de la naturaleza que, según las mediciones, siempre tiene el mismo valor con independencia de la velocidad a la que viaje el observador. A partir de estas dos ideas se llega a la conclusión de que tanto el tiempo como el espacio son aspectos de un espacio-tiempo tetradimensional más grandioso. Einstein también demostró que la velocidad de la luz es la máxima velocidad posible dentro del universo. La relatividad espacial nos obliga a aceptar conceptos extraños, como que el tiempo se frena cuando se viaja muy deprisa. Y también conduce a la ecuación einsteiniana más conocida, la que relaciona la masa y la energía: $E = mc^2$.

Justo antes de este artículo, Einstein publicó otro con cálculos detallados para describir el movimiento browniano. Este fenómeno lo detectó por primera vez el botánico escocés Robert Brown en 1827, al observar mediante el microscopio que los granos de polen suspendidos en agua muestran un movimiento errático. Einstein aportó una demostración matemática de que eso se debe al constante movimiento aleatorio de las moléculas de agua, en lo que fue la primera demostración real de la existencia de los átomos. Los defensores de la idea de que la materia se compone en última instancia de minúsculas unidades indivisibles eran muy conscientes de que el movimiento browniano podía deberse al movimiento de átomos, pero fue Einstein quien lo confirmó. Experimentos basados en este trabajo suyo fueron los que convencieron al fin a las últimas voces que negaban la existencia de los átomos.

Sin embargo, de los tres principales artículos que publicó Einstein en 1905 el más interesante para nuestra historia fue el primero, donde explicaba el origen de un fenómeno conocido como «efecto fotoeléctrico». La fórmula de Planck prácticamente se había ignorado durante cinco años, pero Einstein la resucitó y dio un empujón importante a sus conclusiones.

Partículas de luz

El efecto fotoeléctrico fue otro fenómeno de la física del siglo XIX que no se consiguió explicar en aquel momento. Se proyectaba luz sobre una placa de metal cargada de electricidad y se arrancaban electrones de la superficie para examinar con atención cómo ocurría. Eso permitió a los científicos detectar que la teoría imperante, que describía la luz como una onda, conducía a una contradicción que implicaba dificultades mayores que el problema de la radiación del cuerpo negro.

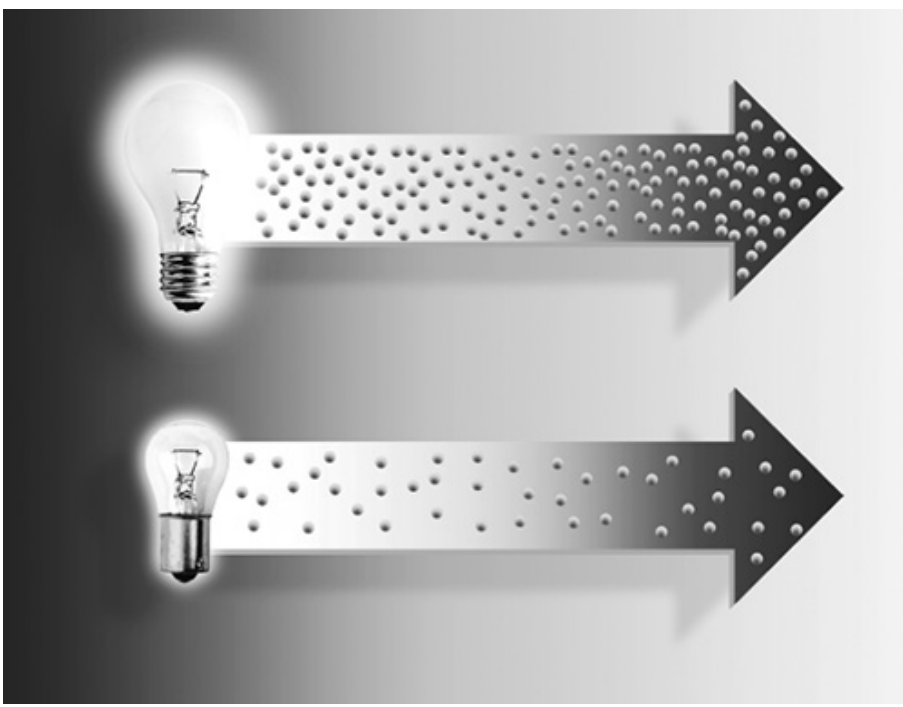


Arriba: La vieja teoría ondulatoria de la luz predecía que cuanta mayor frecuencia tuviera la radiación emitida desde un cuerpo negro, mayor sería su intensidad. Esta intensidad se volvería infinita a frecuencias ultravioletas. Era evidente que algo fallaba en la teoría.
Centro: La teoría cuántica de Planck predecía una curva que concordaba con la vieja teoría ondulatoria en las frecuencias del espectro visible, pero no seguía creciendo a medida que aumentaba la frecuencia, sino que, de acuerdo con esta teoría, la intensidad debía volver a reducirse a cero, en perfecta consonancia con los datos experimentales.
Abajo: Antes de Planck se daba por supuesto que la energía radiada desde un cuerpo negro era continua y que cualquier valor era posible (como cuando una pelota rueda por una pendiente uniforme). Planck planteó que la energía estaba cuantizada y que, como tal, solo podía alcanzar determinados valores discretos.

De hecho, este efecto exhibe tres rasgos misteriosos. En primer

lugar, cabría pensar que si la luz tiene la capacidad de arrancar partículas de materia, entonces su energía dependerá del brillo, o intensidad, de la luz. Sin embargo, se descubrió que la capacidad de la luz para arrancar electrones depende de su longitud de onda. Se trata de un resultado bastante inesperado si contemplamos la luz como una onda, porque el incremento de su intensidad y, por tanto, de su energía, implicaría un aumento del tamaño de sus oscilaciones. Pensemos en las ondas de agua, u olas, que chocan contra el litoral; tienen más energía cuanto más altas sean, no cuanto más deprisa rompan contra la costa. En el efecto fotoeléctrico, la luz de alta intensidad no daba lugar a electrones lanzados con más energía, ¡sino a más cantidad de ellos!

La segunda característica misteriosa, relacionada con la anterior, consistía en que, de acuerdo con la teoría ondulatoria, el efecto fotoeléctrico debía producirse con luz de cualquier frecuencia, siempre que fuera lo bastante intensa como para aportar al electrón la energía necesaria para escapar. Sin embargo, lo observado fue que existe una frecuencia límite por debajo de la cual no se emiten electrones, por muy brillante que sea la luz.



La luz brillante, de mayor intensidad, resulta de una cantidad mayor de fotones que la luz tenue. Pero la energía media de un solo fotón es la misma en ambos casos.

Por último, la teoría ondulatoria señala que al exponer electrones a la energía de una onda de luz, estos necesitan un tiempo finito para absorber la energía suficiente para desprenderse de la superficie, sobre todo si la luz es tenue. Sin embargo, no se detectaba ningún desfase temporal. Los electrones se desprendían en cuanto se lanzaba luz contra la superficie.

Einstein consiguió explicar este efecto al ampliar la idea de Planck de los paquetes de energía lumínica. Recordemos que Planck no había llegado a defender que toda la radiación está cuantizada. En lugar de eso, lo único que propuso fue que un cuerpo negro radiaba energía en paquetes como consecuencia directa de las propiedades de la materia. Pero seguía creyendo que, en general, la radiación electromagnética era continua. La propuesta de Einstein fue que toda la luz se compone en última instancia de cuantos de energía[11], que ahora se conocen como fotones. Esto sobrepasaba lo que Planck estaba dispuesto a aceptar.

La naturaleza dual de la luz

Las aportaciones de Planck y Einstein a la revolución cuántica supusieron un primer paso. Al volver la vista atrás con todo lo que se sabe hoy sobre la riqueza de la mecánica cuántica y los fenómenos que es capaz de explicar, se ve que la idea de que la luz se compone de partículas no es para tanto. Al fin y al cabo, el propio Isaac Newton ya creía que la luz estaba formada por partículas, o «corpúsculos», tal como él las llamaba. Un contemporáneo de Newton, el astrónomo neerlandés Christiaan Huygens, desarrolló una teoría rival ondulatoria para la luz. Sin embargo, hubo que esperar hasta el comienzo del siglo xix para que un inglés llamado Thomas Young evidenciara más allá de toda duda que la luz debía tratarse como una onda.

Young realizó el experimento de la doble rendija[12] con luz (de hecho, también se conoce como el experimento de las rendijas de Young) y, tal como vimos en el Capítulo 1, no existe ningún misterio si se nos permite pensar que son ondas las que atraviesan ambas rendijas al mismo tiempo. Sabemos de qué manera hacen eso las ondas, y que, de manera natural, dan lugar al patrón de interferencia que se observa en la pantalla. No es de extrañar que las observaciones de Young anularan durante cien años la idea de que la luz pudiera

estar formada por partículas. Los físicos del siglo XIX rindieron homenaje a Newton por sus imponentes logros (y aún se lo considera con razón el mayor científico de todos los tiempos), pero no por su idea de los corpúsculos de luz. No había manera de que la descripción corpuscular pudiera dar lugar al patrón de interferencia.

Pero entonces, un siglo después de los experimentos de Young, Einstein demostró que ¡la luz debe interpretarse como una corriente de partículas si queremos explicar el efecto fotoeléctrico!

Entonces ¿qué es lo que sucede? Da la impresión de que no podemos considerar la luz como un puro fenómeno ondulatorio, ni tampoco como algo formado por partículas. Parece comportarse como una onda en determinadas circunstancias (rendijas de Young) y como un conjunto de partículas localizadas en otras (efecto fotoeléctrico). Todos los fenómenos que hemos considerado hasta ahora apuntan hacia la idea de que este desdoblamiento de personalidad de la luz debe tomarse en serio, a pesar del sentimiento natural de malestar que infunde en un primer momento. De hecho, la llamada dualidad onda-corpúsculo de la luz está hoy en día fuera de toda duda.

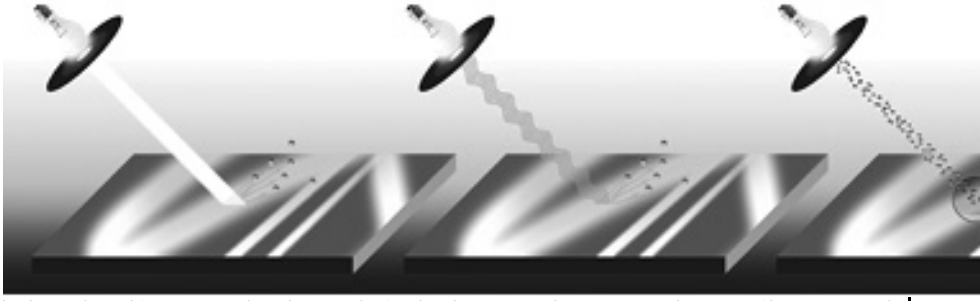
El Premio Nobel de Einstein

Albert Einstein recibió el Premio Nobel de Física de 1921 por su explicación del efecto fotoeléctrico, considerado en la época un descubrimiento mucho más significativo que sus trabajos más conocidos sobre teoría de la relatividad.

Según Einstein, cada electrón sale arrancado cuando lo golpea un solo fotón de luz, cuya energía depende de la frecuencia. Él sostenía que normalmente no vemos la naturaleza corpuscular de la luz debido a la gran cantidad de fotones implicados, del mismo modo que no vemos cada píxel individual de tinta en una imagen impresa. Así que, examinemos brevemente cómo resuelve esta explicación los tres rasgos misteriosos del efecto fotoeléctrico.

El primero de ellos es fácil. El hecho de que la energía del electrón expulsado dependa de la frecuencia de la luz y no de su intensidad es una consecuencia directa de la ecuación de Planck, que relaciona la energía de la luz con la frecuencia.

La segunda característica aparece porque el umbral de producción de electrones solo se alcanza cuando la energía del fotón es suficiente para liberar un electrón. El aumento de la intensidad de la luz solo da lugar a más fotones. Y como los fotones son tan minúsculos y tan localizados en el espacio, hay una probabilidad minúscula de que algún otro electrón pueda alcanzar suficiente energía para escapar al recibir el impacto de más de un fotón.



El efecto fotoeléctrico implica la expulsión de electrones de una superficie metálica arrojando

luz sobre ella. Sin embargo, la concepción de que la luz consiste en ondas no explica lo observado. Lo que se ve solo se explica si se considera que la luz se compone de partículas individuales (fotones).

Por último, el proceso es instantáneo porque los electrones no tienen que acumular energía a partir de una onda que se propaga por el espacio, sino que cada fotón suelta toda su energía contra un electrón durante una única colisión. Si esta energía rebasa el umbral necesario, el electrón escapará.

Pero, espere un minuto, ¿podría haber dos clases de luz: luz ondulatoria y luz grumosa? ¿Puede la luz cambiar de estado dependiendo de cómo la usemos o la detectemos? Los físicos encuentran bastante desconcertante el concepto de fotón. Recuerde que cada fotón individual (una partícula) se asocia a una frecuencia y a una longitud de onda determinadas (propiedades ondulatorias).

Por tanto, ¿qué significa decir que una partícula tiene cierta longitud de onda? Las ondas en propagación tienen longitud de onda; pero las partículas ¡no se propagan en absoluto, vaya!

Bohr: físico, filósofo, futbolista[13]

El siguiente paso en la revolución cuántica lo dio un joven físico danés llamado Niels Bohr, quien llegó a Inglaterra en 1911 desde Copenhague provisto de un flamante título de doctor y las obras completas de Charles Dickens (que usaba para aprender inglés). Obviamente, Bohr aún no era un físico famoso por entonces, pero aquella le pareció una carrera más segura que la del fútbol, donde también destacó como aficionado entusiasta, aunque no alcanzó el nivel de su hermano menor, Harold, quien jugó de defensa en el equipo olímpico danés que perdió la medalla de oro en 1908 frente a Gran Bretaña. Harold se convertiría más tarde en un matemático muy respetado.

La vida de Niels Bohr y de este autor que escribe solo se solaparon durante dos meses, así que, por desgracia, nunca llegué a coincidir con él. Y, de haberlo hecho, nuestra conversación no habría sido muy productiva. Pero he colaborado durante varios años con alguien que lo conoció muy bien. Jens Bang es un físico teórico que ejerció como el último colaborador científico de Bohr, de modo que tiene muchas historias que contar sobre esta gran figura, y un hondo conocimiento de sus consideraciones filosóficas. De hecho, el Bohr filósofo es casi tan célebre como el Bohr científico.

Emprendió sus pesquisas cuánticas cuando se marchó a trabajar a

Mánchester con el neozelandés Ernest Rutherford en 1912. El propio Rutherford era en aquel momento uno de los científicos más eminentes del mundo y había sido galardonado en 1908 con el Premio Nobel de Química, a pesar de ser físico. Bohr llegó hacia la época en que Rutherford presentaba su modelo del átomo. Acababa de descubrir que los átomos están formados por un minúsculo y denso núcleo en el centro, rodeado por electrones aún más pequeños.

Bohr comenzó intentando comprender la estructura del modelo atómico de Rutherford. De ahí que se embarcara en un proyecto y un esfuerzo de medio siglo para captar la esencia de los fenómenos cuánticos, y hoy en día se lo considera con justicia el verdadero padre de la física cuántica. Puede que Planck y Einstein echaran la cosa a rodar, pero Bohr la desarrolló mucho más.

Su primer logro consistió en resolver dos problemas relacionados con la estructura de los átomos: el origen de las líneas espectrales y la explicación de la estabilidad atómica.

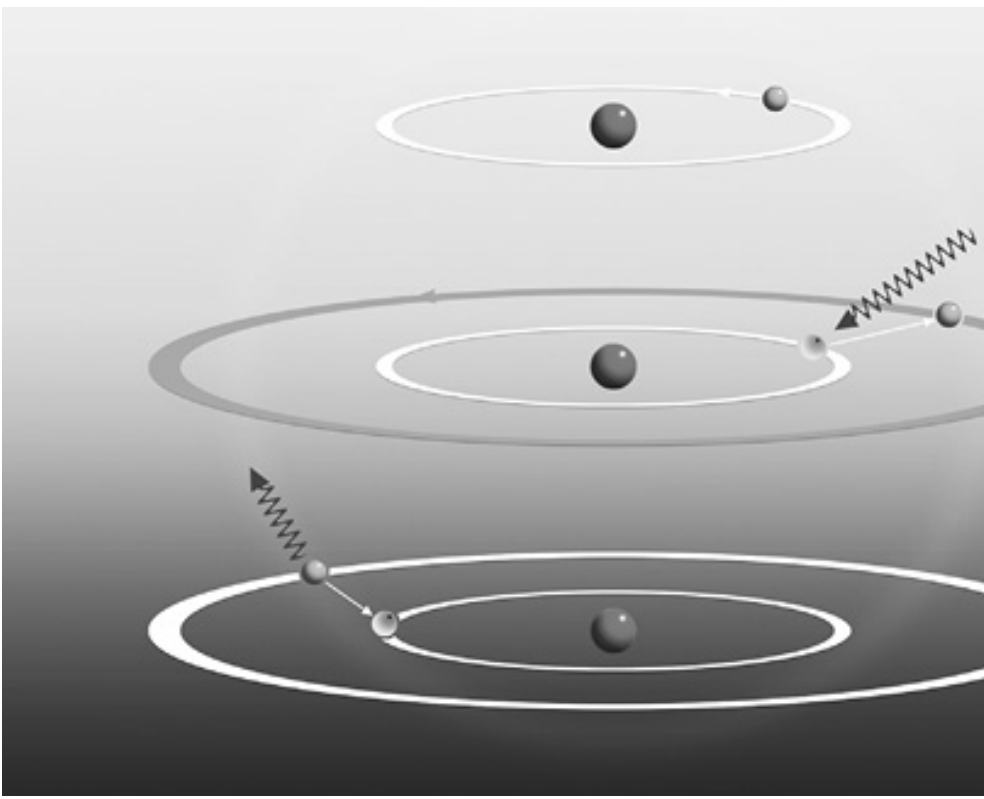
El modelo de átomo de Rutherford apuntaba a que los electrones existen fuera del núcleo a una distancia miles de veces mayor que el tamaño del propio núcleo. Este esquema plantea al instante la cuestión de la estabilidad de los átomos. En primer lugar, los físicos estaban seguros de que los electrones no podían estar en reposo dentro de los átomos, puesto que la fuerza eléctrica de atracción ejercida por el núcleo con carga positiva debía succionar los electrones hacia él. De modo que la respuesta simple sería considerar un modelo planetario en el que los electrones orbitaran de manera continua alrededor del núcleo, de igual manera que la Tierra debe mantenerse en órbita alrededor del Sol para no precipitarse contra él debido a su tirón gravitatorio.

Vista en retrospectiva, la idea de Bohr parece obvia, pero en aquel momento era revolucionaria. Propuso que si toda la materia emite radiación en paquetes (el efecto fotoeléctrico), entonces tal vez los átomos que componen la materia sencillamente no puedan poseer energías intermedias a esos paquetes discretos.

Esta idea iba más allá del postulado de Planck, según el cual, la cuantización de la radiación se debía tan solo a las oscilaciones de los átomos en los cuerpos negros calientes, más que a un rasgo común a todos los átomos debido a su estructura interna.

Bohr postuló que las propias energías del electrón dentro de los átomos están cuantizadas. Es decir, los electrones no son libres de

seguir la órbita que quieran, tal como admitirían las leyes del movimiento de Newton, sino que siguen determinadas órbitas «discretas», como vías de tren concéntricas. Un electrón solo puede caer a la órbita inmediatamente inferior si se desprende de un cuanto de energía electromagnética (un fotón). Del mismo modo, solo podría saltar a la siguiente órbita absorbiendo un fotón. La estabilidad de los átomos la explicó más tarde de un modo más completo un joven genio alemán llamado Wolfgang Pauli, quien desveló que cada órbita electrónica solo podría alojar una cantidad concreta de electrones. De ahí que los electrones solo puedan saltar a una órbita inferior si queda espacio para ellos. Más adelante veremos que los electrones no se pueden concebir como pequeñas partículas que se mueven en círculo alrededor del núcleo, sino como ondas en propagación, donde cada «onda de electrón» envuelve todo el núcleo.



El modelo de Bohr del átomo de hidrógeno consistía en un electrón en una órbita fija alrededor del núcleo atómico. Si el electrón absorbiera un fotón de la frecuencia adecuada (diagrama central) cobraría suficiente energía para saltar a una órbita superior (más exterior). Entonces se dice que el átomo se encuentra en un estado excitado. Esta situación suele ser inestable, y el átomo no tarda en dejar de estar excitado (diagrama inferior). El electrón escupe un fotón con una energía idéntica a la del primero y, al hacerlo, pierde energía y

regresa a su «estado fundamental».

Bohr también consiguió explicar el significado de los espectros atómicos: el hecho de que los elementos emitan luz en ciertos tramos particulares de frecuencias (llamados líneas espectrales), de manera que hay un espectro único para cada elemento. Las frecuencias características a las que un cierto tipo de átomo podía emitir luz se correspondían con ciertas energías (de acuerdo con la ecuación de Planck). Las energías de los fotones emitidos se corresponden con la pérdida de energía de los electrones situados en el interior del átomo cuando descienden a órbitas inferiores.

Conviene subrayar que, aunque Bohr había aplicado a la estructura atómica la idea de Planck de la cuantización, no podía explicar cómo saltaban los electrones de una órbita a otra. Al igual que el pobre y viejo Planck, Bohr había introducido la fórmula de una manera *ad hoc*. No la había inferido a partir de principios fundamentales más profundos, como suele preferirse en física teórica. Y, aunque su modelo atómico de un Sistema Solar en miniatura parecía funcionar muy bien, seguía conteniendo aspectos de la física newtoniana que resultaron ser erróneos. Pero lo peor de todo es que su modelo solo parecía funcionar con el hidrógeno, que contenía ¡un único electrón en órbita! No podía enfrentarse a nada más complejo que eso. Un esclarecimiento mucho más completo de la estructura atómica requería el desarrollo de toda la mecánica cuántica que llegó diez años después.

Los físicos actuales se quejan con razón de que en los colegios se siga enseñando el modelo de átomo de Bohr. No es ese el aspecto de los átomos[14]. El modelo del átomo de hidrógeno de Bohr puso fin a la primera fase de la revolución cuántica, conocida hoy como la vieja teoría cuántica.

La llegada de un príncipe francés

Ahora daremos un salto hacia delante, hasta comienzos de la década de 1920 para encontrarnos con un joven príncipe francés llamado Louis de Broglie[15], quien preparaba por entonces su tesis doctoral. De acuerdo, no era exactamente un príncipe (puesto que no era el primogénito), pero sí era un noble procedente de una familia

aristócrata, y sus ancestros habían servido a los reyes de Francia que se remontaban hasta aquel célebre Luis (Luis XIV).

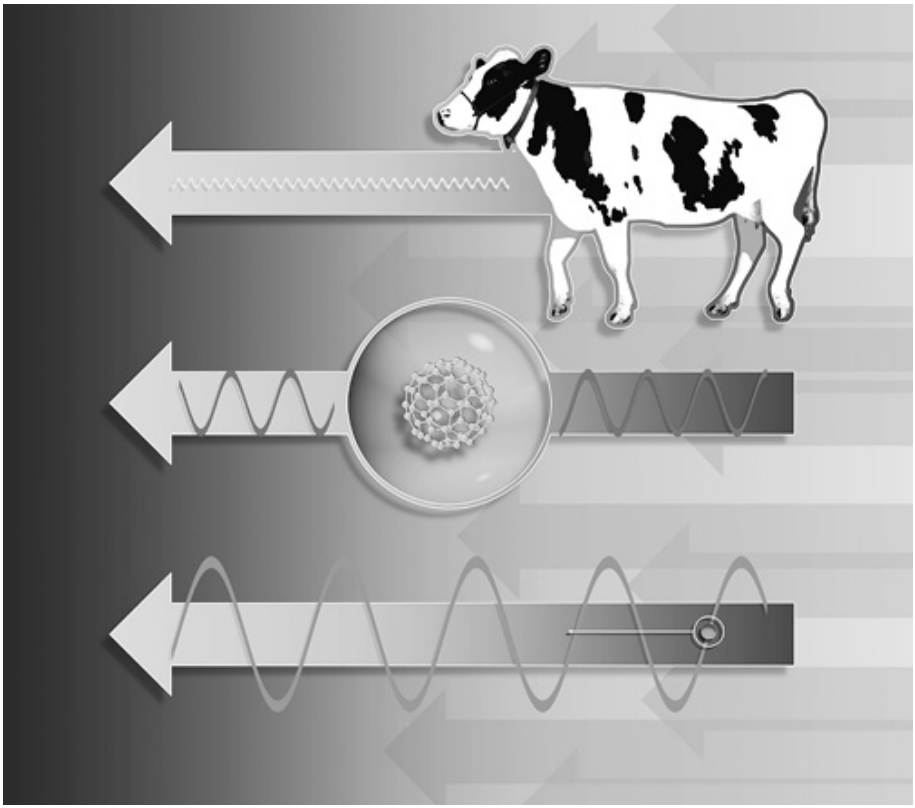
De Broglie presentó su tesis en 1924, en la que hacía una atrevida propuesta: si la luz, que nos resulta más fácil considerar como onda, puede comportarse a veces, de acuerdo con Planck y con Einstein, como una corriente de partículas, sería todo un detalle y un rasgo de simetría en la naturaleza que las partículas en movimiento también pudieran comportarse a veces como ondas.

Esto tal vez suene un tanto extraño de entrada, pero pensémoslo del siguiente modo. En la década de 1920 los físicos estaban muy habituados a la idea de Einstein de que la materia y la energía fueran intercambiables mediante su ecuación $E = mc^2$. De acuerdo con ella, la materia se puede considerar algo así como energía congelada, y ambas se pueden transformar la una en la otra. Por tanto, como la luz, o más bien la radiación electromagnética, que no es más que una forma de energía, puede tener una doble personalidad, ¿por qué no iba a ocurrir lo mismo con la materia?

De Broglie planteó que todo objeto material podía asociarse con una «onda de materia» cuya longitud de onda dependería de su masa. Cuanto más masiva fuera una partícula, más corta sería la longitud de la onda asociada a ella. Nótese que uso el término «asociada» aquí, lo que implica que De Broglie aún consideraba los objetos materiales como «paquetes» sólidos y que la onda es algo así como un añadido. Mientras que en el caso de la luz ya hemos visto que se trata de la misma «cosa» que a veces se comporta como una onda, y otras, como un conjunto de partículas.

De Broglie se inspiró en el trabajo del físico estadounidense Arthur Compton, quien había aportado indicios más sólidos de que la naturaleza de la luz consiste en un conjunto de partículas. En 1923, un año antes de la propuesta de De Broglie, Compton había realizado un experimento que confirmó de manera impresionante la existencia de los fotones. Compton había lanzado rayos X (básicamente luz de alta frecuencia) contra un bloque de grafito, y descubrió que los rayos X rebotaban con una frecuencia algo más baja que la que portaban en su origen. No era eso lo que predecía la vieja teoría ondulatoria, según la cual la frecuencia de la luz debía mantenerse invariable. Pero si los rayos X fueran fotones de alta energía que chocan contra electrones individuales en el grafito, entonces cierta fracción de su energía se perdería y daría como resultado, de acuerdo con la fórmula de Planck,

una caída de la frecuencia.



Escala de las ondas de materia de De Broglie asociada a diversos objetos.
Arriba: La longitud de onda de una vaca, según De Broglie, sería billones de veces menor que el tamaño de los átomos, y demasiado insignificante para detectarse. De hecho, casi se situaría en una escala a la que el propio concepto de espacio pierde su sentido. De modo que no debemos preocuparnos por las vacas ondulantes.
Centro: La longitud de onda de De Broglie de una molécula de carbono C60 (futboleno) que viaja a varios metros por segundo tiene el tamaño aproximado de la molécula en sí (alrededor de un nanómetro).
Abajo: Un electrón que viaja a varios metros por segundo tiene una longitud de onda de De Broglie equivalente al espesor de un cabello humano (una fracción de milímetro), un tamaño lo bastante grande como para que su naturaleza de onda cuántica se revele con facilidad en experimentos, y hasta en la vida cotidiana.

De Broglie no pudo evitar pensar que ahí había una simetría evidente. ¿Por qué los fotones tienen características tanto de ondas como de partículas, y los electrones no? Al fin y al cabo, el «esparcimiento de Compton», como se le conoce al proceso en la actualidad, induce a pensar en bolas sólidas en colisión. Así que si un fotón se puede considerar en el mismo plano que un electrón, entonces tal vez también sea cierto lo contrario. La confirmación

experimental de la naturaleza ondulatoria de los electrones tendría que esperar hasta 1927, cuando se demostró por primera vez que haces de electrones daban lugar a fenómenos de interferencia (la primera confirmación experimental del truco de las dos rendijas con partículas de materia).

Y mientras tanto, ¿qué tenía De Broglie en mente? Suele reinar una gran confusión en torno a la cuestión de la naturaleza ondulatoria de la materia. De hecho, De Broglie no planteó que un electrón sea de por sí una onda en propagación (aunque hubo otros que lo sugirieron muy poco después), sino que era una partícula sólida localizada transportada por lo que se conoce como un paquete de ondas, que es un fragmento aislado de una onda, como un pulso, que se puede construir mediante la superposición de muchas ondas distintas de diferentes longitudes de onda y amplitudes, de tal modo que se interfieren y cancelan entre sí en todos sitios salvo en la minúscula región localizada donde resulta estar la partícula.

De Broglie desarrolló una fórmula que relacionaba la cantidad de movimiento de la partícula, ya fuera un fotón o un electrón, con la longitud de su onda asociada: cuanta más cantidad de movimiento (o «bríο») tenga, más corta será su longitud de onda. Por eso nunca conseguimos detectar comportamientos ondulatorios asociados a los objetos cotidianos, como las personas, los balones de fútbol, o incluso los granos de arena, ya que esos objetos, que son muchos órdenes de magnitud más masivos que los electrones, tienen longitudes de onda muchos órdenes de magnitud más cortas que las longitudes de la escala subatómica, y por tanto no pueden detectarse. Pero ¿pueden medirse las ondas de materia asociadas a los electrones, incluso a átomos completos? O mejor aún, si existen ¿sirven para explicar el truco de las dos rendijas? ¿Será la onda asociada al átomo lo que atraviesa ambas rendijas, mientras que el átomo en sí solo atraviesa una de ellas?

Por aquella época, el revolucionario planteamiento de Louis de Broglie fue demasiado impactante para que lo aceptaran sus contemporáneos. De hecho, estuvieron a punto de no concederle el doctorado, y fue la intervención de Einstein en el último minuto (quien tuvo acceso a una versión preliminar de la tesis) lo que convenció al tribunal.

Poco después de que su obra se conociera, los acontecimientos empezaron a precipitarse. Físicos de toda Europa comenzaron a

encajar las distintas piezas de una nueva estructura matemática y a debatir sobre el significado de todo ello. No solo había piezas que encajaban en su sitio con rapidez, sino que también se lograron hallazgos y conocimientos simultáneos e independientes por parte de distintas personas cuya conexión no se estableció hasta más adelante.

Así que concluyo aquí este capítulo histórico para centrarme a continuación en lo que nos dice la mecánica cuántica sobre el comportamiento de la naturaleza, más que en la manera en que los físicos lograron sus descubrimientos. La mecánica cuántica se puede explicar de diversas formas, y seguir de qué modo desarrollaron sus ideas los padres fundadores de la materia probablemente no sea la mejor de ellas. Por ejemplo, se han popularizado muchas versiones de la mecánica cuántica que están obsoletas porque contemplan temas como la «dualidad onda-corpúsculo» como uno de los conceptos fundamentales sobre los que se asienta toda la teoría. Esto puede dar lugar a cierto embrollo y confusión, y será difícil evitarlo, pero con cuidado lo intentaré.

3. De *termo* que significa «calor», y *dinámica,* que significa «movimiento». Este campo de la ciencia guarda relación con la manera en que el calor y otras formas de energía se transfieren de un cuerpo a otro.

4. En esencia, el término *macroscópico* se refiere a todo lo que vemos a nuestro alrededor lo bastante grande como para que se comporte de una manera razonable «no cuántica», mientras que el término *microscópico* alude sin más a aquello que tiene un tamaño (a un nivel atómico o inferior) lo bastante pequeño como para que las leyes cuánticas determinen su comportamiento.

5. El estudio de cómo deducir propiedades macroscópicas de la materia a partir de la física microscópica.

6. Dos buenas fuentes para indagar en esta controversia son las obras *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912,* del filósofo Thomas Kuhn (Madrid, Alianza, 1980; trad. castellana de Miguel Paredes Larrucea), y *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo XX,* del historiador de la ciencia Helge Kragh (Madrid, Akal, 2007; trad. castellana de D. Duque Campayo, A. Granados Sanandrés y M. Sangüesa Lazcano).

7. A Planck le costó más adelante aceptar las predicciones de la teoría cuántica, y dedicó muchos años a intentar encontrar una manera de sortear sus conclusiones.

8. A veces la gráfica la representa frente a la frecuencia en lugar de hacerlo frente a la longitud de onda. Pero como esas dos propiedades de las ondas son equivalentes (las longitudes de onda cortas implican alta frecuencia, y las longitudes de onda largas implican baja frecuencia), ambos tipos de gráficas aportan la misma información.

9. La expresión «catástrofe ultravioleta» no se usó hasta 1911.

10. Es algo parecido a la diferencia entre las notas musicales emitidas con una guitarra y con un violín. Las guitarras tienen trastes (puentes metálicos) en el mástil. Cuando el dedo pisa una cuerda contra el mástil justo debajo de un traste, suena una nota que resulta de la vibración de la cuerda entre el traste y el puente situado en el extremo opuesto. Las diferentes longitudes que adoptan las cuerdas en vibración al presionarlas contra dos trastes sucesivos causan una diferencia sonora de medio tono. De modo que, al igual que el piano, la guitarra no puede (sin cierta destreza) emitir un sonido intermedio entre dos semitonos. El violín, en cambio, no tiene trastes, así que sus cuerdas pueden tener la frecuencia, o tono, que queramos dependiendo del punto exacto en que coloquemos los dedos sobre el mástil.

11. Podemos imaginarlos como concentraciones de energía localizadas en el espacio. Sin embargo, pasó algún tiempo hasta que se aceptó de verdad la idea de que la luz consiste en «partículas».

12. Por supuesto, en el Capítulo 1 califiqué el experimento de «truco» solo para añadir un toque de teatralidad.

13. Y fundador de la física cuántica; perdón, a estas alturas se puede hacer hasta un juego de palabras, ¿o es más bien una aliteración?

14. Habrá que esperar hasta el Capítulo 7 para ver una representación mejor de los átomos. Pero, por supuesto, «el aspecto» de los átomos no es lo que son en realidad, tal como también veremos más adelante.

15. Pronunciado «debrói».

3. La probabilidad y el azar

¿Cree usted en el destino?

Esta pregunta tiene un significado bastante claro para la mayoría de nosotros: que ciertos sucesos tenían que ser así, o que dos personas estaban destinadas a encontrarse. Pero ¿podría encerrar algo de verdad esa idea?

Tal vez le guste a usted leer el horóscopo con la idea inocente y bastante inverosímil de que la posición de las estrellas y los planetas influye de algún modo en cómo nos irá en la semana que tenemos por delante. Por supuesto, aunque muchos no nos tomamos en serio los horóscopos, la idea de que el futuro sea predecible de alguna manera es muy interesante. De hecho, hasta el advenimiento de la revolución cuántica, los científicos estaban convencidos de que era posible, en principio, lo que insinuaba que, aunque no pudiéramos predecirlos, todos los acontecimientos futuros estaban predeterminados y destinados a suceder de todas formas.

Isaac Newton creía que todas y cada una de las partículas del universo debían obedecer unas leyes simples del movimiento sometidas a fuerzas bien definidas. Esta visión mecanicista, que aún comparten científicos y filósofos de manera generalizada más de dos siglos después, defiende que da igual lo complejo que sea el funcionamiento de la naturaleza, porque todo debería poder reducirse en última instancia a interacciones entre los elementos esenciales que conforman la materia. Un fenómeno natural, como un mar tempestuoso, o la meteorología, tal vez parezca aleatorio e impredecible, pero esa impresión no es más que una consecuencia de su complejidad y de la inmensa cantidad de átomos que intervienen.

Sin embargo, si pudiéramos en principio conocer con exactitud la posición y el estado del movimiento de cada partícula en un sistema determinado, sin importar cuántas participan en él, deberíamos entonces poder predecir, mediante las leyes de Newton, la interacción y el movimiento de dichas partículas y, por tanto, el estado en el que se encontrará el sistema en cada instante preciso del futuro. En otras palabras, el conocimiento exacto del presente debería permitirnos

predecir el futuro. Esto dio lugar a la idea newtoniana de que el universo es como un «mecanismo de relojería», es decir, que, en principio, no encierra ninguna sorpresa, puesto que todo lo que pueda ocurrir alguna vez no es más que el resultado de interacciones fundamentales entre sus partes. Esto se conoce como determinismo, porque el futuro se puede determinar en su totalidad si se tiene un conocimiento completo del presente.

Por supuesto, en la práctica esa determinación resulta imposible, salvo con los sistemas más simples. Sabemos muy bien que los meteorólogos no son capaces de predecir qué tiempo hará mañana con una seguridad plena. Ni siquiera podemos saber si al lanzar una moneda al aire saldrá «cara» o «cruz», o dónde se detendrá la bola de una ruleta. Otro campo de estudio de la física actual es la teoría del caos, la cual establece que habría que conocer las condiciones iniciales de un sistema con una precisión infinita para poder determinar su evolución futura. La teoría del caos complica las cuestiones prácticas que rodean al determinismo.

Y en efecto, ejemplos mecanicistas simples, como los recién mencionados, se vuelven insignificantes cuando nos planteamos cómo podríamos tratar la inmensa complejidad del cerebro humano para comprender la noción del libre albedrío. Pero el principio siempre es el mismo: como los humanos también estamos hechos de átomos, las leyes de Newton deberían valer también para nuestro cerebro. Así que, siempre que adoptamos lo que percibimos como una decisión libre sobre algo, en realidad se trata de procesos mecánicos e interacciones atómicas dentro de la materia gris sometidos a leyes deterministas, al igual que todo lo demás.

Aunque parezca una concepción bastante deprimente, no debería incomodarnos demasiado porque la idea de tener suficiente información para predecir el futuro es demasiado increíble para considerarla. Pero la cuestión que nos ocupa es hipotética: si tuviéramos una computadora lo bastante potente y con una memoria lo suficientemente grande como para guardar la información sobre la posición y la velocidad de cada partícula del universo, entonces se supone que podríamos calcular cómo evolucionará el cosmos.

Uno de los cambios más profundos que trajo la revolución cuántica para el pensamiento humano fue la noción de indeterminismo, es decir, la desaparición del determinismo, junto con el concepto del universo como mecanismo de relojería. Así que lamento comunicarle

que el «destino» como idea científica se demostró falso hace tres cuartos de siglo.

El resultado de una partida de billar

Pensemos en cómo haría una computadora potente para desarrollar un modelo del resultado de una tirada de billar al golpear la bola blanca contra las bolas del conjunto. Cada bola de la mesa saldrá lanzada en alguna dirección y la mayoría de ellas recibirá más de un impacto, puesto que muchas rebotarán en la banda. Por supuesto, el ordenador necesitaría conocer con precisión la intensidad del primer empujón que recibirá la bola blanca y el ángulo con el que chocará contra la primera bola del conjunto. Pero ¿bastará con eso? Cuando todas las bolas se hayan detenido al fin (puede que algunas incluso hayan entrado en las troneras), ¿cuánto se habrá acercado a la realidad la predicción de la distribución emitida por la computadora? Aunque el resultado es perfectamente predecible cuando en la colisión se ven implicadas tan solo dos bolas, es imposible tener en cuenta cómo acabará la compleja distribución múltiple de muchas bolas. Con que una sola bola se desplace con un ángulo ligeramente distinto, bastará para que otra bola, que en un principio la habría evitado, rebote contra ella y ambas trayectorias sufran una desviación extrema. De pronto, el resultado final cambia por completo.

Entonces, parece que no solo hay que introducir en la computadora las condiciones iniciales de la bola blanca, sino también la disposición precisa de todas las demás bolas sobre la mesa: si se están tocando o no, qué distancias exactas median entre ellas y las bandas, etcétera. Pero ni siquiera eso bastará. Una mota diminuta de polvo en alguna de las bolas será suficiente para alterar su trayectoria en una fracción de milímetro o para frenarla en una cantidad minúscula. Una vez más, esto dará lugar de manera inevitable a un efecto en cadena que alterará el resultado final. Esto se conoce como «efecto mariposa» en teoría del caos, y alude a que el batir de alas de una mariposa que provoca un cambio insignificante en la presión del aire puede inducir de manera gradual un cambio enorme en lo que habría sucedido si la mariposa se hubiera quedado quieta, como por ejemplo, provocar algo después una tormenta en el otro lado del planeta que de otro modo no se habría producido.

Por tanto, necesitaríamos darle al ordenador información precisa sobre el estado exacto de la superficie de la mesa. Puede que esté más desgastada por unos lugares que por otros. Incluso la temperatura y la humedad del aire ejercerán un efecto minúsculo.

Aun así, podemos pensar que no es tarea imposible. En principio se puede hacer. Por supuesto, si no hay fricción entre las bolas y la mesa, estas seguirán chocando y dispersándose durante mucho más tiempo, y por tanto habría que conocer las posiciones iniciales de las bolas con una precisión aún mayor para determinar dónde acabarán cuando al fin se detengan[16].

«¿Y qué?», pensará usted. Al fin y al cabo, como nunca seremos capaces de conocerlo todo sobre un sistema particular, estamos obligados a apañarnos asignando probabilidades a los distintos resultados. Cuanto más sepamos, más seguros estaremos de lo que sucederá.

A veces es algo más que la mera ignorancia lo que nos impide emitir predicciones fiables, pero también la incapacidad de controlar las condiciones de partida. Cuando lanzamos una moneda al aire simplemente es demasiado pedir que repitamos la misma acción para lograr el mismo resultado. Si lanzo una moneda al aire y sale «cara», será demasiado difícil volver a lanzarla de una manera idéntica, de forma que dé la misma cantidad de giros y vuelva a salir «cara».

Esto no es más que otra manera de decir que no disponemos de información completa sobre el sistema. En el ejemplo de la mesa de billar, y teniendo un conocimiento completo, jamás podría repetir la misma tirada golpeando la bola blanca exactamente igual, para conseguir un resultado final idéntico, de tal modo que todas las bolas acaben en la mismísima posición que la primera vez. Sin embargo, esa capacidad de repetición constituye la esencia del mundo de Newton. Este comportamiento determinista es característico de lo que se conoce como mecánica newtoniana, o mecánica clásica. En la mecánica cuántica, las cosas son muy diferentes.

Imprevisibilidad cuántica

Descendiendo al terreno cuántico, nos encontramos ante una clase muy grave de imprevisibilidad que no podemos achacar a nuestro desconocimiento de los detalles del sistema que estamos estudiando,

ni a una incapacidad práctica para establecer las condiciones de partida, sino que resulta ser un rasgo fundamental de la propia naturaleza a este nivel. No hay manera de predecir con seguridad qué sucederá a continuación en el mundo cuántico, no porque nuestras teorías no sean lo bastante buenas o porque carezcamos de suficiente información, sino porque la naturaleza en sí opera de una manera muy «indeterminable».

A menudo resulta que lo único que podemos hacer en el reino de los átomos es calcular probabilidades para distintos resultados. Sin embargo, esas probabilidades no se asignan de la misma manera en que podríamos asignar probabilidades al lanzamiento de una moneda o de un dado al aire. Las probabilidades cuánticas están integradas en la teoría en sí, y nunca, ni tan siquiera en principio, podemos hacer nada mejor.

La desintegración radiactiva de los núcleos atómicos ofrece un buen ejemplo de ello; es decir, situaciones de partida idénticas conducen a resultados distintos. Imaginemos un millón de núcleos atómicos radiactivos idénticos que son inestables y que, tarde o temprano, se habrán de «desintegrar» espontáneamente con la emisión de una partícula que les haga adoptar una forma más estable. Aunque la mecánica cuántica permite calcular eso que llamamos vida media (el tiempo tras el cual se habrá desintegrado la mitad de los núcleos), no puede decirnos cuándo se desintegrará un núcleo concreto. La vida media solo tiene significado cuando se aplica a una cantidad estadísticamente elevada de núcleos idénticos. Podemos calcular la probabilidad de que un núcleo se haya desintegrado después de un tiempo específico, pero el hecho de que no podamos hacer nada más que eso no se debe a nuestra ignorancia.

Una manera de salir del dilema consistiría sencillamente en decir que no todo se reduce a la mecánica cuántica, y que la imprevisibilidad de la desintegración radiactiva se debe en realidad a nuestra ignorancia. Nos falta un conocimiento más profundo de la naturaleza que nos permita predecir con exactitud cuándo se desintegrará un núcleo dado, del mismo modo que un conocimiento completo de todas las fuerzas implicadas en el lanzamiento de una moneda nos permitiría predecir su resultado. Si esto fuera cierto, necesitaríamos ir más allá de la mecánica cuántica para encontrar la respuesta. En el Capítulo 6 veremos que Albert Einstein era de esta opinión; no aceptaba lo que parecía insinuar la mecánica cuántica:

que nuestro mundo es, a su nivel más esencial, intrínsecamente impredecible. De hecho, una de las citas más conocidas de Einstein es esa en la que afirmaba no creer que «Dios juega a los dados», en el sentido de que no podía aceptar que la naturaleza sea probabilística. Sin embargo, Einstein estaba equivocado.

Veamos ahora más de cerca el origen de la imprevisibilidad y del indeterminismo cuánticos.

Chupinazos

Gracias sobre todo a Isaac Newton entendemos y predecimos cómo se mueven e interaccionan los objetos cotidianos influidos por distintas fuerzas. Recuerdo un artículo aparecido en una revista de física unos años atrás donde se analizaba desde un punto de vista matemático la trayectoria curva de un balón de fútbol. El futbolista brasileño Roberto Carlos, quien aparecía en la portada de aquel número de la revista, es famoso por sus espectaculares tiros directos a puerta con los que consigue que el balón bordee la barrera defensiva de un modo mucho más impresionante que la mayoría de los futbolistas. La clave (no es que piense que Roberto Carlos ha estudiado alguna vez las ecuaciones en detalle) estaba en la precisión con que sus chupinazos hacen girar el balón y en la interacción de este con el aire mientras permanece suspendido. De manera análoga, a lo largo de los años se ha dedicado mucho ingenio al diseño de las bolas de golf para controlar sus trayectorias al golpearlas de una forma determinada. Por supuesto, existen numerosos ejemplos más. La cuestión es que en todos los casos en los que se trata el movimiento de los objetos macroscópicos, las ecuaciones del movimiento se pueden resolver si se introducen los datos necesarios. Si conocemos la masa y la forma de un cuerpo, la naturaleza exacta de las fuerzas que actúan sobre él, y la posición y velocidad del objeto en el momento presente, entonces la resolución de las ecuaciones del movimiento permitirá calcular su posición y velocidad en cualquier instante del futuro. Esta era la clave de la discusión anterior sobre el determinismo newtoniano.

Las ecuaciones del movimiento de Newton son en realidad tan precisas y fiables que permiten predecir el movimiento orbital de los planetas y de sus satélites hasta un futuro lejano. La NASA usó esas ecuaciones para trazar la trayectoria de los cohetes que envió a la

Luna y trajo de vuelta. En todos los ejemplos recién mencionados, si se especifica el estado actual de un sistema físico y las fuerzas que actúan sobre él, en principio, se pueden determinar con precisión todos los estados futuros del sistema.

Entonces, ¿por qué no aplicamos la misma ecuación para describir la manera en que se mueve una partícula microscópica, como un electrón? Si el electrón pulula ahora mismo por aquí y le aplicamos cierta fuerza, por ejemplo, sometiéndolo a un campo eléctrico, entonces deberíamos ser capaces de precisar con exactitud en qué lugares se encontrará dentro de cinco segundos.

Pues no es así. Resulta que las ecuaciones que rigen el comportamiento de los objetos cotidianos, desde granos de arena hasta balones de fútbol y planetas, no tienen ninguna utilidad en el mundo cuántico.

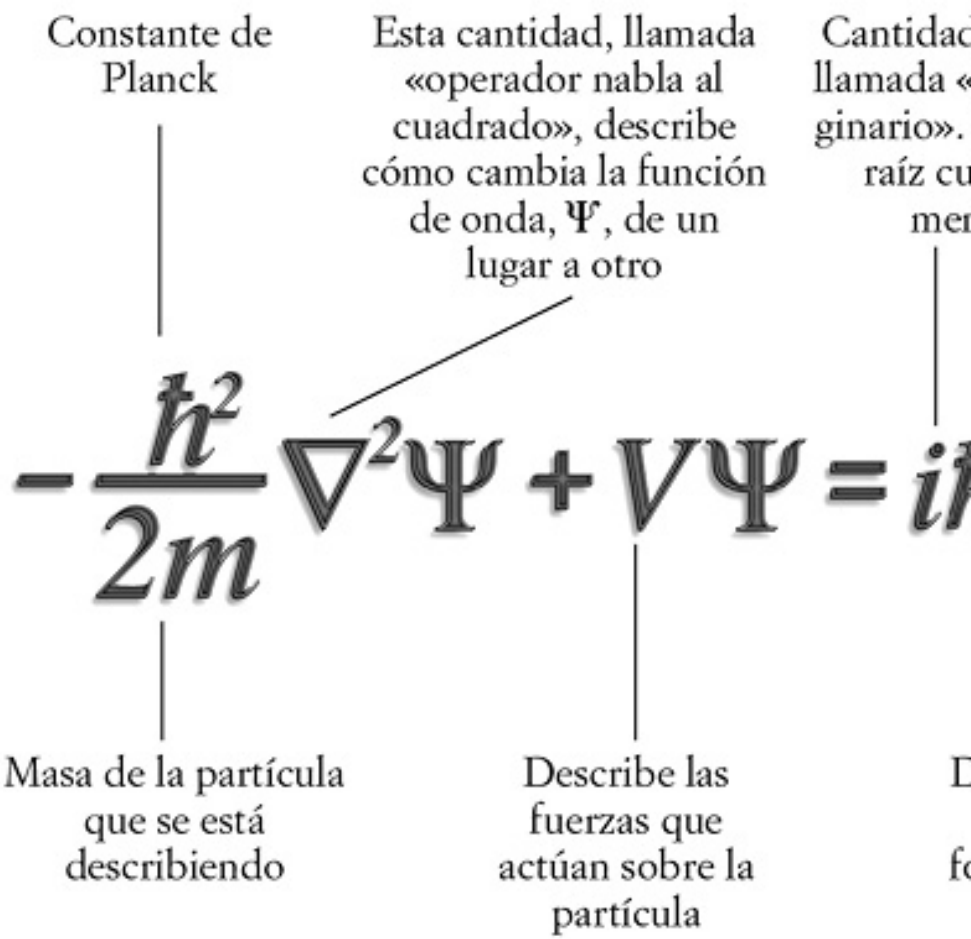
Anatomía de una ecuación

Cuando hablamos de «resolver» una ecuación para una partícula clásica (por ejemplo, cualquiera que no esté sujeta al comportamiento cuántico) nos referimos a extraer del álgebra un valor para la posición y la velocidad exactas de la partícula en algún instante determinado del futuro. Pero la ecuación de Schrödinger es diferente. Su solución, digamos para el movimiento de un electrón dentro de un átomo, no se limita a una serie de números que describen dónde estará el electrón en cualquier momento dado (que es lo que se obtendría al aplicar las ecuaciones de Newton para seguir el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra).

La ecuación de Schrödinger es mucho más rica. Se trata de una cantidad matemática que se conoce como «función de onda», y que se simboliza mediante la letra griega Y (psi). Si busca usted el origen de toda la rareza cuántica, lo ha encontrado: todo está encerrado en la función de onda.

En el álgebra elemental siempre hay una cantidad desconocida llamada *«x»* (imagine que x es la posición de la partícula: *«x* señala el punto» que necesitamos resolver). En el álgebra más avanzada, el valor de x puede depender del valor de una segunda incógnita, por ejemplo, t, que suele representar el «tiempo». Así, por ejemplo, si $t = 1$ entonces podría ser que $x = 4{,}5$, y si $t = 2$, entonces $x = 7{,}3$, y así sucesivamente. Por supuesto, son valores que acabo de inventar, pero eso es lo que sucede cuando resolvemos la ecuación del movimiento para una partícula clásica. Solo que, como la partícula existirá en un espacio tridimensional, harían falta tres números para definir su posición: x, y, z. La cuestión es que x, y, z no son más que símbolos que representan ciertos números; no son «cosas» reales.

La función de onda en la ecuación de Schrödinger se parece un poco a esto. Es la cantidad desconocida que se puede resolver en cada instante temporal para describir el estado de una partícula cuántica. Con *estado* me refiero aquí a todo lo que se puede saber acerca de una partícula.



En física siempre se usan símbolos matemáticos para describir alguna cantidad o propiedad del sistema que se está estudiando. Usamos la letra *«V»* para representar el voltaje, *«P»* para la presión, etcétera. Lo que cambia en la mecánica cuántica es que, a diferencia de la presión y del voltaje, no existe nada parecido a una cinta métrica con una graduación que permita medir la función de onda. Aunque el concepto de presión es un tanto abstracto en tanto que es una cantidad que describe el movimiento colectivo de las moléculas de un gas, al menos se puede percibir físicamente. No ocurre así con la función de onda.

La ecuación más importante de la física

Gran parte del mérito para el desarrollo de la interpretación teórica de la mecánica cuántica recae sobre el físico austriaco Erwin Schrödinger, quien dio a las ideas de De Broglie una base matemática firme. Es importante advertir que existen varias formas matemáticas de

describir el comportamiento de un sistema cuántico, como un electrón o un átomo, y el procedimiento de Schrödinger no fue más que una de ellas. Sin embargo, es la manera en que suele enseñarse la mecánica cuántica a los estudiantes universitarios de física y también es el planteamiento que seguiré yo aquí.

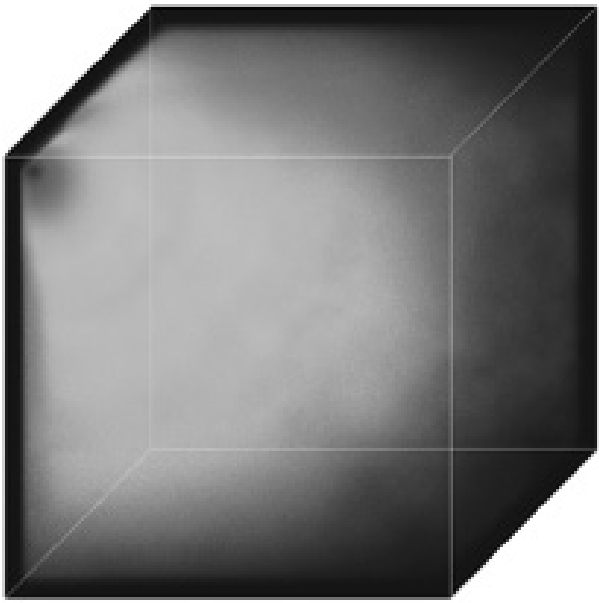
Schrödinger se propuso comprobar si la idea de las ondas de materia de De Broglie podía usarse de algún modo para explicar el modelo del átomo de Bohr. Recordemos que Bohr había defendido que los electrones del interior de los átomos se desplazan siguiendo órbitas fijas (cuantizadas), pero nadie sabía por qué tenía que ser así. Schrödinger propuso una nueva ecuación que describe, no el modo en que se mueve una partícula, sino la manera en que se propaga una onda. Así llegó a lo que se conoce como una ecuación de onda.

En la actualidad, casi se ha generalizado la costumbre de que los libros divulgativos de ciencia que versan sobre ideas de la física moderna eviten incluir cualquier ecuación matemática, salvo una: $E = mc^2$, que ya expusimos con anterioridad. Pero la ecuación de Schrödinger merece al menos una ojeada rápida (véase el recuadro de la página 87) aunque solo sea por motivos estéticos[17].

La resolución de la ecuación de Schrödinger nos brinda una cantidad matemática llamada función de onda. Y ahí es donde entra toda la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica. En el caso de un electrón, por ejemplo, la función de onda no nos da su ubicación exacta en un instante temporal determinado, sino tan solo la probabilidad de que el electrón se encuentre en un lugar dado si lo buscamos ahí. Por supuesto, la primera reacción al leer esto será: pero eso no es un resultado lo bastante bueno: limitarse a decir dónde podría estar el electrón no parece toda la información que se puede tener de él. Por supuesto, esas meras palabras no le explicarán nada a usted. Así que lo intentaré con más empeño.

La función de onda contiene gran cantidad de información. En cualquier instante temporal dado adopta un valor para cada punto del espacio. De modo que, a diferencia de la posición que ocupa en el espacio una partícula clásica, la función de onda abarca todo el espacio, de ahí el término *onda*. Sin embargo, no deberíamos pensar que representa una onda física real, como una onda de luz. A estas alturas debería confesar que nadie sabe a ciencia cierta qué es en realidad la función de onda. La mayoría de los físicos la consideran una entidad matemática abstracta que se puede usar para obtener

información sobre la naturaleza. Otros le atribuyen una realidad propia, muy extraña e independiente. En el Capítulo 6 veremos que ambas consideraciones pueden ser válidas. Curiosamente, lo relevante aquí es que no importa si la función de onda es real o no, sus propiedades matemáticas son las mismas y no hay ninguna duda sobre lo que puede revelarnos acerca de la forma en que se comporta la materia a una escala subatómica.



La distribución de probabilidad de un electrón encerrado en una caja. No se trata de una nube física que describa un electrón «desparramado», sino tan solo una nube matemática de probabilidad. Si sabemos con certeza que el electrón partió de una de las esquinas superiores de la caja, entonces, un poco más tarde, su función de onda se habrá extendido hasta ocupar todo el volumen de la caja. Sin embargo, la mayor densidad de probabilidad, calculada a partir de la función de onda, revela que aún es más *probable* que el electrón se encuentre cerca de su posición inicial, si hubiera que localizarlo. A medida que pase el tiempo, la nube de probabilidad se expandirá de un modo más uniforme y el electrón tendrá las mismas probabilidades de encontrarse en cualquier lugar de la caja.

Como ejemplo, consideremos un electrón individual encerrado dentro de una caja. Supongamos que conocemos el lugar exacto del que parte, y que introducimos esa ubicación en la ecuación de Schrödinger. Eso nos permitirá calcular qué función de onda tendrá un poco más tarde. Ahora, supongamos que elaboramos una tabla en un archivo informático o en una hoja de papel con una serie de números que representan los valores de la función de onda del electrón en

varios puntos de una rejilla que ocupe todo el volumen de la caja. Esa información ya no nos servirá para localizar el electrón con precisión; tenemos que conformarnos con saber dónde es más probable que se encuentre.

A la función de onda se le asignan dos números en cada punto del espacio. La probabilidad de que el electrón se halle en una minúscula unidad de volumen en torno a ese punto se corresponde con la suma de los cuadrados de esos dos números[18].

La naturaleza probabilística, y por tanto la imprevisibilidad inherente, de la mecánica cuántica requiere ahondar un poco más en la naturaleza de la función de onda. Por ejemplo, le ayudará tener una ligera idea sobre cómo cambia una función de onda con el tiempo mediante una práctica analogía.

Un ladrón acaba de salir de la cárcel, pero la policía local está convencida de que no está rehabilitado y, analizando un plano de la ciudad, consigue trazar un itinerario probable de sus diversos paraderos desde el momento en que lo liberaron. Como no pueden concretar su localización exacta en un momento determinado, deciden asignar probabilidades a los robos cometidos en diversos barrios. En un primer momento, las viviendas más próximas a la cárcel son las que corren un riesgo mayor, pero el área amenazada aumenta a medida que transcurre el tiempo. Asimismo pueden afirmar con relativa seguridad que las zonas más ricas corren más peligro que las más pobres. Esta oleada de delitos que se propaga por la ciudad debido a un solo individuo se puede interpretar como una onda de probabilidad. No se trata de algo tangible o real, sino que es un mero conjunto de números abstractos asignados a cada zona de la ciudad. De manera análoga, la función de onda se extiende desde el punto donde se vio al electrón por última vez, y el hecho de conocer la función de onda permite asignar probabilidades al lugar donde volverá a manifestarse.

La policía no tardará en comprobar que sus predicciones eran acertadas cuando se informe de un robo desde una dirección concreta. Eso alterará la distribución de probabilidades, puesto que ahora saben que el ladrón no puede estar lejos de la escena del crimen. Del mismo modo, cuando se detecta el electrón en un lugar determinado, su función de onda queda alterada al instante. En el mismo momento de la detección habrá una probabilidad cero de que esté en cualquier otro lugar. Pero si lo soltamos de nuevo, su función de onda evoluciona y

vuelve a propagarse.

¿Qué pasa cuando no estamos mirando?

En cambio, hay una gran diferencia entre el ejemplo del ladrón y un electrón. Aunque la policía solo pueda asignar probabilidades a los paraderos del ladrón, saben que se debe únicamente a que carecen de una información completa. A fin de cuentas, no es que el ladrón en sí se propague por la ciudad, y aunque la policía deba contar con que puede estar en cualquier sitio, lo cierto es que solo puede encontrarse en un lugar en cada instante determinado. Es algo tan obvio que decirlo parece una pérdida de tiempo. Pero ¿qué pasa con los electrones? La mayoría de los físicos creen (y con razón, tal como veremos en los dos próximos capítulos) que durante todo el tiempo que no estamos siguiendo el movimiento del electrón, lo único que tenemos a nuestra disposición para describirlo es su función de onda. Es más: el electrón en sí ni siquiera existe como partícula clásica simple con una localización definida en cada momento. Su influencia se propaga por el espacio. Nunca sabremos cómo es posible. Lo único que tenemos es la función de onda, y esta no es más que un conjunto de números (con significado físico, por supuesto). En cuanto miramos, se dice que la función de onda «se colapsa» y que el electrón se convierte en una partícula localizada.

Puede que suene ridículo y absurdo. ¿Por qué no se puede comportar sin más el electrón como una partícula real en todo momento? Sin duda, el hecho de que no se pueda predecir con seguridad qué hace cuando no lo miramos no significa que no esté haciendo nada. Si sus reflexiones van por estos derroteros, no es el único: Einstein también pensaba así. Pero la mayor parte de los físicos está convencida de que esta cómoda interpretación es errónea. Sin embargo, una minoría significativa y cada vez mayor de ellos ya no está tan segura, y explicaré por qué en el Capítulo 6.

Pero volvamos a nuestra sencilla analogía y a la expresión «oleada de delitos», que denota algo que experimenta oscilaciones: crestas y valles como las ondas en la superficie de un estanque. De hecho, las ondas que parten de un mismo punto se propagarán en círculos concéntricos (como cuando tiramos una piedra a un estanque). Del mismo modo, la función de onda cuántica también tiene que ser

«ondulada», porque si no lo fuera no veríamos la propiedad de la interferencia, propia de las ondas, en el truco de la doble rendija. A estas alturas no sería de extrañar que el truco de las dos rendijas guardara alguna relación con las propiedades de las funciones de onda.

En general, una función de onda no se limita a oscilar como una ola de agua. Es mucho más compleja que eso. Ya he comentado que, en cada punto del espacio, la función de onda se define mediante dos números que se conocen como su parte real y su parte imaginaria. La unión de todos los números «reales» produce una onda, y la de los números «imaginarios» da lugar a otra, y la función de onda completa es una combinación de las dos. Además, una función de onda típica plasmada en una gráfica tendrá una forma compleja dependiendo del sistema que esté describiendo. Un solo electrón encerrado en una caja se describirá, por supuesto, mediante una función de onda bastante simple. Pero la función de onda que describa la estructura de un núcleo atómico, formado por numerosos protones y neutrones regidos por reglas complicadas, es mucho más compleja.

El principio de incertidumbre de Heisenberg

Una de las consecuencias más importantes de la naturaleza probabilística de la función de onda es el concepto de indeterminación, que no debe confundirse con el concepto de indeterminismo que tratamos con anterioridad y que dice que el conocimiento de ciertos aspectos del estado de una partícula, como su posición en un instante temporal concreto, no implica que se pueda conocer con certeza su posición en el futuro. La indeterminación, por su parte, establece que nunca se puede saber todo al mismo tiempo, y con total precisión, sobre un sistema cuántico, por más que intentemos medirlo.

El ejemplo más conocido de indeterminación viene dado por la relación de incertidumbre, descubierta por primera vez por Werner Heisenberg. Un electrón que se mueva libre por el espacio, podría estar en cualquier sitio; decimos entonces que existe una incertidumbre infinita en cuanto a su posición. Pero si tenemos un electrón encerrado en una caja muy pequeña, podemos decir que su posición es bien conocida, y que la incertidumbre acerca de su

posición es baja. Esto significa que los números asociados a su función de onda equivalen a cero en todos los lugares del exterior de la caja. Se dice que una función de onda así está localizada en el espacio.

El principio de incertidumbre de Heisenberg dice que no se puede conocer al mismo tiempo la posición exacta y la cantidad de movimiento de una partícula cuántica. Esta característica de la naturaleza de «o un aspecto o el otro, pero no ambos a la vez» condujo a Niels Bohr a su principio de complementariedad, el cual establece que ambos aspectos aparentemente en conflicto son necesarios para la descripción completa de una partícula cuántica. El contorno de este jarrón también se puede ver como dos perfiles humanos enfrentados. Sin embargo, es difícil ver ambos aspectos de la imagen al mismo tiempo; si vemos dos caras, no hay jarrón; si es un jarrón, no hay ninguna cara.

Hasta aquí he descrito a qué se alude al hablar de la «función de onda de posición» (puesto que a partir de ella se puede calcular la probabilidad de encontrar el electrón en distintas posiciones). Pero existe otra clase de cantidad –llamada «función de onda de cantidad de movimiento» (o «función de onda de momento»)– que revela la probabilidad de que el electrón tenga una cierta cantidad de movimiento, o velocidad, en cualquier instante dado. Si conocemos la función de onda de posición, podemos calcular la función de onda de la cantidad de movimiento, y viceversa, recurriendo a un procedimiento matemático llamado «transformada de Fourier». Una función de onda de posición localizada siempre dará lugar a una

función de onda de la cantidad de movimiento extendida[19], y viceversa. Así que un electrón que tenga una función de onda de posición localizada, y por tanto una incertidumbre pequeña en relación con su posición, siempre tendrá una gran incertidumbre en cuanto a su cantidad de movimiento (o velocidad). De manera análoga, un electrón cuya velocidad sea bien conocida (mediante una función de onda de cantidad de movimiento localizada) tendrá necesariamente una función de onda de posición extendida que dará lugar a una gran incertidumbre en cuanto a sus paraderos.

Esta es la esencia del principio de incertidumbre de Heisenberg. En su forma matemática dice que nunca se puede conocer al mismo tiempo la ubicación y la velocidad precisas de un electrón (o de cualquier otra entidad cuántica). Esto no es resultado, como se lee en muchos libros, de un experimento en el que se propina al electrón un empujón aleatorio inevitable durante el acto de localizar su posición, y que, por tanto, altera su velocidad y dirección, sino que es consecuencia de la naturaleza de las funciones de onda que describen la posible ubicación y el posible estado de movimiento del electrón incluso antes de que miremos.

El hecho de si el electrón tiene o no en realidad una posición y una velocidad definidas en un instante determinado antes de que lo estemos mirando se sigue debatiendo en la actualidad en la comunidad física. Lo cierto del asunto es que la relación de incertidumbre es una consecuencia de la relación existente entre los dos tipos de funciones de onda, y como las funciones de onda nos dicen todo lo que se puede llegar a saber sobre el electrón, eso quiere decir que no podemos decir nada más sobre él. El principio de incertidumbre impone un límite sobre lo que se puede predecir acerca de un estado cuántico, y en consecuencia, sobre lo que podemos saber sobre él cuando estamos mirando.

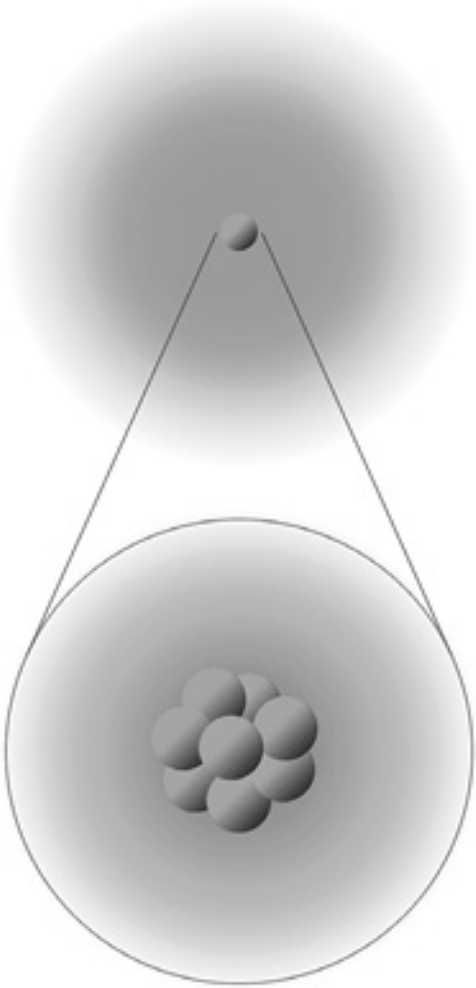
Halos nucleares

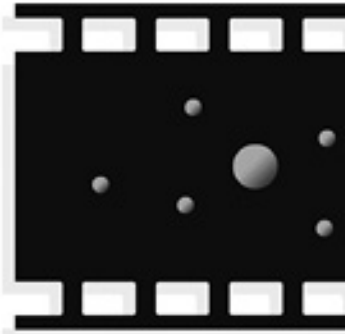
En la física existen numerosos fenómenos que no deberían ser posibles de acuerdo con la mecánica clásica, y que nos obligan a apelar al principio de incertidumbre de Heisenberg para explicarlos. Uno de ellos se encuentra en mi campo de investigación de la física nuclear. Tal como explicaré en el Capítulo 7, el núcleo atómico es uno de los sistemas físicos más complejos. Aún estamos desvelando sus secretos casi un siglo después de su descubrimiento. También es un lugar donde la mecánica cuántica funciona de un modo supremo.

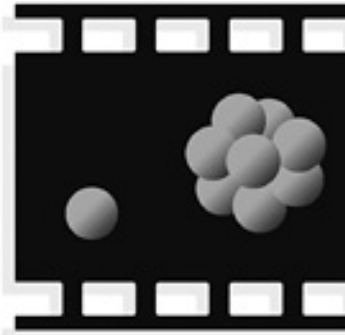
Más adelante observaremos más de cerca el interior de los núcleos atómicos para ver de qué manera se mantienen estrechamente unidas las partículas que los componen, protones y neutrones, mediante la fuerza nuclear fuerte. Esta fuerza actúa como pegamento dentro de un rango muy reducido, de modo que sus efectos desaparecen por completo fuera de la superficie del núcleo.

Los núcleos de los elementos más ligeros suelen tener casi la misma cantidad de protones con carga positiva que de neutrones eléctricamente neutros. Los núcleos que portan más cantidad, sea de protones o de neutrones, que el promedio para su masa, tienden a ser inestables y a transformarse con rapidez en una forma más estable mediante la conversión de algunos de los protones o neutrones sobrantes en la partícula que está en desventaja numérica, para así recuperar el equilibrio.

A mediados de la década de 1980, un grupo de investigación japonés realizó experimentos en el laboratorio Lawrence-Berkeley de California que llevaron al descubrimiento de una nueva propiedad de los núcleos del elemento litio muy ricos en neutrones. Las formas estables del litio cuentan con núcleos atómicos formados por tres o cuatro neutrones unidos a tres protones. El experimento de Berkeley reveló que el núcleo de litio-11 (tres protones más ocho neutrones) parecía tener un tamaño mucho mayor del esperado; mucho más grande que el que cabría esperar por los neutrones adicionales. Al lanzar un haz de esos núcleos en el interior de un acelerador y hacerlos chocar contra una laminilla de carbono, midieron cuántos lograban llegar al otro lado. Cuanto más grandes fueran los núcleos de litio-11, más probabilidad habría de que chocaran con los núcleos de carbono y se fragmentaran. Aunque se esperaba que bastantes de ellos pasaran intactos a través de la lámina, los detectores situados al otro lado captaron muchos menos. Como analogía un tanto burda, sería como pasar arena por un tamiz. Cuanto más grandes sean los granos, menos consiguen llegar al otro lado.







La descripción cuántica de un átomo es la de una nube de probabilidad de electrones alrededor del minúsculo núcleo. Sin embargo, esto es lo que podemos decir «antes de mirar». Si pudiéramos obtener una instantánea del átomo *(derecha superior)* veríamos electrones individuales en posiciones específicas. El halo de neutrones también se parece a esto. No es más que una nube de probabilidad de neutrones *(izquierda inferior)*. El hecho de que se extienda más allá del resto del núcleo significa que, si hubiera alguna manera de hacerle una fotografía al núcleo *(derecha inferior),* lo más probable es que nos encontráramos con los neutrones del «halo» a cierta distancia de todos los demás neutrones y protones que residen mucho más apretados en el corazón del núcleo.

Los teóricos no tardaron en darse cuenta de que estaban tratando con núcleos diferentes a cualquier otro observado en la naturaleza. Los dos neutrones más al exterior del litio-11 mantienen una unión muy débil con el resto del núcleo, el llamado «corazón» o *core,* y pasan la mayor parte del tiempo bastante alejados del mismo. De hecho, permanecen suspendidos bastante más allá del ámbito de acción de la fuerza nuclear que los mantiene en su lugar, formando lo que se ha dado en llamar un «halo de neutrones». Por supuesto, el volumen del halo sigue siendo muchísimo más pequeño que el que ocupan los electrones de un átomo de litio.

El halo de neutrones es un fenómeno puramente cuántico y no debería existir según la

mecánica clásica[20]. Sin embargo, he usado el mismo lenguaje para describir esos neutrones de halo que el que empleó Bohr en su vieja teoría cuántica de electrones en órbita. Ahora sabemos que esto no es correcto en realidad. Así que permítame ser un poco más cuidadoso.

El principio de incertidumbre se puede usar para explicar de una manera menos directa el gran tamaño de los núcleos con halo. Otro tipo de experimento empleado para estudiarlos consiste en descomponerlos a propósito mediante una reacción nuclear y medir de qué manera se separan las piezas. Se ha descubierto que los fragmentos escindidos permanecían bastante cercanos entre sí al salir despedidos y que se iban separando muy despacio.

En mecánica cuántica decimos que la cantidad de movimiento interna de los fragmentos tiene una dispersión muy pequeña, cercana a cero, es decir, que la función de onda de cantidad de movimiento está muy localizada. Como las piezas (es decir, los dos neutrones y el corazón del núcleo) se mantienen ligadas de un modo tan débil, no hace falta mucho para descomponer esos núcleos. De modo que la función de onda de la cantidad de movimiento que describe su movimiento relativo después de descomponer el núcleo no tiene una forma muy distinta de la que describiría el núcleo si estuviera intacto.

El principio de incertidumbre nos dice que esta función de onda de la cantidad de movimiento se corresponde con una función de onda de posición muy extendida y, como consecuencia, con una distribución de probabilidad extendida. Por tanto, el halo de neutrones no consiste en realidad en dos neutrones «esparcidos», sino que es más bien un gran volumen de espacio alrededor del corazón donde los neutrones tienen gran probabilidad de ser localizados. Es una nube de probabilidad de neutrones.

Los años dorados de la mecánica cuántica

El periodo que va desde 1925 hasta 1927 vivió una revolución dentro de la física cuántica mucho mayor que la iniciada por Planck en el cambio de siglo. Niels Bohr recibió el Premio Nobel en 1922 «por su contribución a la investigación de la estructura de los átomos y la radiación que emiten». Pero por entonces una serie de físicos jóvenes europeos estaban acabando sus doctorados y empezando a plantearse si la teoría de Bohr de las órbitas cuantizadas de electrones en los átomos sería de verdad la última palabra. Los tres grandes maestros de la teoría atómica en aquel tiempo eran Bohr, en Copenhague, Arnold Sommerfeld, en Múnich, y Max Born, en Gotinga. Pero fueron sus jóvenes alumnos los que ejercieron mayor impacto.

Antes de 1925, los físicos eran conscientes de que uno de los grandes problemas de la teoría atómica de Bohr[21] estribaba en que no servía para explicar cómo interaccionan dos electrones dentro de los átomos usando la idea de las órbitas de Bohr. Sus ecuaciones funcionaban bien para el átomo de hidrógeno, que contenía un solo electrón, pero no conseguían describir la estructura atómica del siguiente elemento, el helio, que consta de dos electrones. Uno de aquellos chavales jóvenes, Wolfgang Pauli, describió la desesperada situación en una carta que envió a un colega en mayo de 1925:

> En este momento, la física vuelve a estar muy embrollada; en cualquier caso, es demasiado complicada para mí, y desearía ser un cómico de cine o algo así y no haber oído hablar jamás sobre física.

El primer gran logro llegó de Werner Heisenberg, un joven alemán que a pesar de su brillantez casi suspendió ante el tribunal de su tesis doctoral en 1923. Mientras se recuperaba de un ataque de alergia al polen en la isla alemana de Heligoland durante el verano de 1925, logró un gran avance en la formulación de una teoría matemática nueva. Al mismo tiempo, Max Born y el joven ayudante que tenía en Gotinga, Pascual Jordan, presentaron un artículo en el que proponían que «las verdaderas leyes de la naturaleza deberían implicar tan solo cantidades que se puedan observar». En cuanto Heisenberg regresó a Gotinga y oyó hablar de aquel trabajo, lo adoptó en su nueva teoría y argumentó que la vieja teoría Bohr-Sommerfeld no podía ser correcta, puesto que en el fondo se basaba en conceptos que jamás se podrían observar, es decir, las órbitas de los electrones. Su teoría defendía que solo tienen relevancia física las cantidades que se pueden medir de forma directa, como las energías de los electrones.

En septiembre de 1925, Heisenberg, Born y Jordan habían desarrollado una nueva teoría

de «mecánica» cuántica. En esencia, su idea se basaba en una serie de relaciones matemáticas bastante extrañas en las que, básicamente, el producto de dos cantidades, digamos *A* por *B,* no era igual que *B* por *A*. Esto es absurdo, por supuesto, con números ordinarios: es evidente que 3 por 4 es igual que 4 por 3. Pero las cantidades de su teoría seguían una regla diferente para la multiplicación, que ya era bien conocida entre los matemáticos, la que rige las cantidades denominadas matrices. Esta nueva teoría no tardó en conocerse como mecánica matricial y fue atribuida a Heisenberg, pero en realidad no deberían subestimarse las aportaciones de Born y de Jordan. El voluminoso artículo de los tres titulado «On Quantum Mechanics II»[22] se publicó en febrero de 1926.

Otros físicos jóvenes, como Pauli y Dirac, ayudaron a resolver muchos de los problemas de la nueva teoría y realizaron sus propias contribuciones, y fueron galardonados con el Premio Nobel. Heisenberg recibiría el Nobel de 1932.

Al mismo tiempo, en enero de 1926, el austriaco Erwin Schrödinger publicó su primer artículo perfilando una formulación alternativa. Su teoría atómica partía de la idea de De Broglie sobre las ondas de materia y llegaba a unos resultados idénticos a los de Heisenberg. Su versión se conoció como mecánica ondulatoria. Sin embargo, a diferencia de De Broglie, Schrödinger suprimió la idea de que las partículas de materia, como los electrones en el interior de los átomos, tuvieran ondas asociadas, y defendía que solo las ondas eran reales.

La mecánica ondulatoria de Schrödinger y su ecuación, ahora archiconocida, supusieron un triunfo instantáneo. La mayoría de los físicos consideraron más sencillo tratar con su planteamiento que con el formalismo matricial de Heisenberg.

Suele creerse que Dirac fue la primera persona que reveló que las teorías de Schrödinger y de Heisenberg eran equivalentes (como decir lo mismo en dos idiomas distintos). Pero lo cierto es que fue Pauli el primero en demostrarlo (en una carta que nunca llegó a publicarse y que no apareció impresa hasta muchos años después de su fallecimiento).

En la primavera de 1927, Heisenberg publicó su famoso principio de incertidumbre, al que llegó en gran parte gracias a los debates que mantuvo con Bohr y Pauli. Lo que no se ha reconocido es que el principio de incertidumbre se basaba de un modo decisivo en la mecánica ondulatoria. Y eso a pesar de que Heisenberg y la mayoría de las grandes figuras de la época, fueron especialmente críticos con la teoría de Schrödinger.

En la actualidad se puede decir que el enfoque de Schrödinger se enseña a los estudiantes de física, mientras que quienes ejercen como físicos teóricos suelen usar una combinación de la mecánica matricial y la ondulatoria. Schrödinger compartió el Premio Nobel de Física de 1933 con Paul Dirac.

Desintegración radiactiva

Ron Johnson, profesor emérito de Física, Universidad de Surrey

Tal vez el logro más espectacular de los muchos conseguidos por la mecánica cuántica sea su explicación del fenómeno de la radiactividad. El esquema newtoniano de un mundo formado por partículas con posiciones y velocidades definidas en todo momento arroja una predicción concreta pero tremendamente errada para el tiempo de vida de un núcleo que experimenta el proceso de desintegración alfa. No importa cuántas veces se combinen los protones y neutrones del núcleo para dar lugar a una configuración de partícula alfa formada por 2 protones y 2 neutrones, porque, según Newton, ¡la partícula alfa nunca se emite!

La situación de una partícula alfa en el interior de un núcleo radiactivo se puede comparar con una bola que rueda por el fondo de un cuenco. Una bola que rodara a la misma velocidad sobre la mesa que hay fuera del cuenco, tendría la misma energía, pero la mecánica de Newton prohibiría por completo que una bola situada dentro del cuenco apareciera de repente sobre la mesa que hay fuera de él. Para lograr esta transición habría que proporcionar momentáneamente una energía adicional a la bola que le permitiera subir por la pared del cuenco hasta caer por el borde. Sin embargo, eso no sería necesario con una bola del tamaño de una partícula alfa inmersa dentro de un cuenco del tamaño de un núcleo atómico.

Un núcleo radiactivo típico ronda unos 0,000 000 000 000 015 metros (15 femtómetros) de ancho, y una partícula alfa es unas 4 veces más pequeña. Son unas dimensiones tan

diminutas comparadas con las de la bola y el cuenco que no es raro que la concepción de Newton no se pueda aplicar aquí. La manera de considerar esa partícula alfa en mecánica cuántica no consiste en plantearse dónde está y a qué velocidad se mueve. Por supuesto, podemos formular esas preguntas, y las mediciones adecuadas darán las respuestas. Pero se obtiene una imagen más completa al preguntarse qué aspecto tiene la función de onda. Para responder eso hay que recurrir a la ecuación de Schrödinger (véase el cuadro de la página 87), del mismo modo que en el caso de la bola y el cuenco hay que recurrir a la ecuación de Newton. Cuando se explora una región nueva del universo no nos sorprende que los físicos tengan que usar herramientas diferentes.

La ecuación de Schrödinger predice que, en el caso de un cuenco de tamaño nuclear, la función de onda de la partícula alfa puede tener un valor considerable a distancias muy apartadas del núcleo. Esto se debe a que las funciones de onda tienen propiedades ondulatorias y, por tanto, no están sujetas a las mismas reglas que las partículas. El valor de la función de onda en una región del espacio revela la probabilidad de encontrar la partícula alfa en ese lugar. Por tanto, si la ecuación de Schrödinger predice que la función de onda de la partícula alfa tiene un valor no despreciable a distancias muy alejadas del núcleo, entonces el núcleo tiene una posibilidad de «desintegrarse». La ecuación de Schrödinger predice que esto solo sucederá si la energía es la adecuada. Según la ecuación de Einstein $E = mc^2$, la energía adecuada para que ocurra se da cuando el núcleo tiene la masa correcta.

La predicción de Newton de la probabilidad de desintegración asciende justo a cero incluso cuando se da la energía adecuada, lo cual no solo impide explicar las observaciones relacionadas con núcleos radiactivos, sino que tampoco explica todo un conjunto de predicciones adicionales que se pueden realizar con la función de onda de la partícula alfa. Así, por ejemplo, se puede usar para predecir la vida media del núcleo y cómo depende esto de su masa y de cuántos neutrones y protones contiene. La vida media no es más que un aspecto de la amplitud probabilística de la partícula alfa. Otros procesos relacionados con las interacciones de las partículas alfa con los núcleos verifican otros detalles.

Con frecuencia se oye la queja de que la mecánica cuántica no predecirá el instante en que un núcleo particular emitirá una partícula alfa. En vista de la cantidad de detalles que revela la mecánica cuántica, parece una crítica demasiado puntillosa a la luz de la incapacidad absoluta de la concepción newtoniana para permitir ¡cualquier desintegración!

16. Poco a poco se irían deteniendo debido a la resistencia del aire y a la pérdida de energía a través del calor y el sonido de cada colisión.

17. Otra cuestión es si a los adolescentes les parece molona o deprimente para llevarla impresa en una camiseta. En realidad, ahora que lo pienso, sería dárselas de enterado.

18. En términos matemáticos, esto se debe a que la función de onda es lo que se denomina una «función compleja» y, por tanto, tiene lo que se conoce como parte «real» y parte «imaginaria», pero no es necesario entrar en esta cuestión aquí.

19. Pero con esto no digo que esté expandida en el espacio, sino que permite todo un amplio rango de valores a lo largo de un intervalo de posibles cantidades de movimiento.

20 Dada su elevada inestabilidad, con una vida aproximada de una décima de segundo.

21 1. Que más tarde Sommerfeld amplió y generalizó para incluir órbitas elípticas de electrones además de las circulares simples de Bohr.

22 2. Tres meses antes Born y Jordan publicaron un artículo previo titulado «On Quantum Mechanics».

4. Conexiones misteriosas

Si la exposición sobre funciones de onda del capítulo anterior le pareció algo abstracta y más bien innecesaria, entonces tal vez deba retroceder y volver a leer el primer capítulo para recordar de qué trata este libro. En el presente capítulo ahondaremos en algunos de los otros conceptos extraños que nos impone la mecánica cuántica. En la base de todos ellos se encuentra la función de onda. Por supuesto, estoy de acuerdo en que es muy difícil relacionar las extrañas propiedades de una cantidad matemática abstracta, como la función de onda, con el mundo real. El mero hecho de disponer de fórmulas matemáticas que nos permitan calcular y predecir propiedades de un átomo no significa que la función de onda constituya una descripción matemática del átomo en sí o, peor aún, que la función de onda sea el átomo. Lo que sí sabemos es que, con independencia de lo que vaya a suceder, el mundo cuántico es muy raro. Pero la mecánica cuántica describe esa rareza con gran precisión, tal como veremos en la segunda mitad de este libro.

Normalmente, siempre que intento explicarle la física a mi esposa, Julie, su mirada se vuelve indiferente al tiempo que apenas dedica esfuerzos a reprimir un bostezo. Así que, cuando unos años atrás, conseguí tenerla como audiencia cautiva, aproveché mi oportunidad. Íbamos a reunirnos con algunos amigos en una bodega de nuestra localidad, pero después de que llegáramos y pidiéramos vino, recibimos el mensaje de que nuestros amigos no podían acudir. Como aquella noche habíamos endosado los niños a los abuelos, no estábamos dispuestos a perdernos nuestra velada de libertad. Así que después de la charla habitual sobre cómo conseguiríamos algún día vivir en una de las grandes casas del paseo marítimo o, si eso fallaba, sobre el color del que pintaríamos el baño, se produjo un silencio en la conversación.

Así que proclamé que aquella era una ocasión perfecta para explicarle a Julie los misterios de la mecánica cuántica y el truco de las dos rendijas. Para mi sorpresa, ella accedió a escucharme sin soltar ningún comentario sarcástico. Alrededor de una hora más tarde (y una botella o dos de tinto chileno) concluí con una floritura convencido de

que al fin la habría dejado impactada con lo raro que tiene que ser el mundo subatómico, y henchida de admiración ante su inteligente marido. Pero en lugar de eso, me miró incrédula y meneó despacio la cabeza: «Bueno, eso no son más que un montón de sandeces. ¡Simplemente no me lo creo!». ¿Qué responder a eso? No existen pasos lógicos de razonamiento que se puedan seguir para explicar la mecánica cuántica y que acaben llegando a una conclusión ineludible. Y tampoco podía convencerla de que el patrón de interferencia de las dos rendijas es real haciéndole una demostración in situ.

Pero aquella reacción suya ni me sorprendió ni me decepcionó. Al fin y al cabo, los físicos llevan tres cuartos de siglo intentando comprender la mecánica cuántica y en realidad aún no lo han conseguido. Hasta a mí me sigue inquietando a veces, después de muchos años de estudio. Sé aplicar sus reglas y, debido a la especialidad que estudio, sé aplicar sus matemáticas al estudio del comportamiento y las propiedades de los núcleos atómicos. Pero si me preguntan qué significa todo ello, me siento tan contrariado como cualquiera. Mi única ventaja frente a usted es que yo estoy convencido de que no existe una respuesta sencilla o una explicación clara e intuitiva.

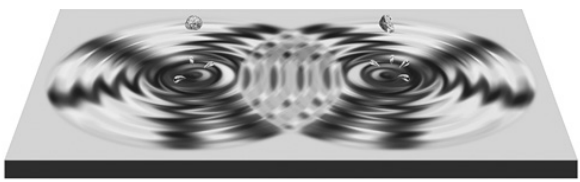
Tras haber expuesto en el capítulo anterior la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica que surge de las propiedades de la función de onda, ahora nos centraremos en rasgos aún más extraños, dotados de los correspondientes nombres intrigantes.

Superposición

La idea de la superposición no es exclusiva de la mecánica cuántica, sino que constituye una propiedad general de todas las ondas[23]. Imagine que ve zambullirse a alguien en una piscina vacía[24]. Observará las olas que se desplazan hacia fuera por la superficie del agua en forma de ondulaciones simples hasta alcanzar el extremo opuesto de la piscina. Esto difiere mucho del aspecto del agua cuando la piscina está llena de gente nadando y chapoteando. La turbulencia de la superficie del agua se debe ahora al efecto combinado de muchas perturbaciones y se obtiene mediante la suma de todas ellas. Este proceso de suma de distintas ondas se conoce como superposición. El patrón de interferencia que vimos en el experimento de la doble

rendija con luz es una consecuencia directa de la superposición de las ondas de luz que salen de las dos rendijas. Lo que queremos saber es si se da un proceso similar cuando lanzamos átomos a través de las rendijas.

Entonces, ¿qué sucede cuando cada átomo llega a la pantalla que porta las dos rendijas? Tal vez se propaguen gradualmente en forma de nube esparcida que a continuación fluye por ambas rendijas a la vez. Pero esto no explica la interferencia. Para eso necesitamos una estructura ondulatoria. Recuerde que lo único que tenemos a nuestra disposición (para describir el estado del átomo cuando no lo estamos mirando) es la función de onda, la cual se calcula resolviendo la ecuación de Schrödinger. Resulta que esta ecuación tiene la misma propiedad matemática que todas las demás ecuaciones de onda, en tanto que sus distintas soluciones se pueden sumar entre sí para dar lugar a otras soluciones nuevas. De igual modo que se puede tener una superposición de ondas de agua o de luz, también se puede tener una superposición de funciones de onda.



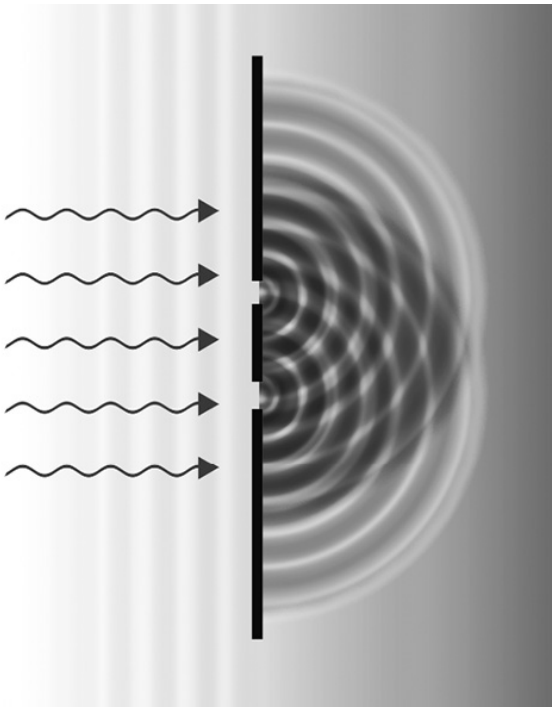
Superposición de ondas: si se tiran dos piedras a un estanque de forma que caigan próximas entre sí, las ondas se propagan hasta encontrarse y crean una superposición con una figura muy diferente a la de las dos series de ondas concéntricas, debido a la interferencia.

Y aquí es donde nos topamos con nuestra siguiente dificultad conceptual. Consideremos una función de onda que describe un electrón con una energía determinada. Si se frena el electrón[25] de forma que reduzca la energía inicial a la mitad, entonces, por supuesto, quedará alterada su función de onda. Sin embargo, dada la posibilidad de superposición de estas dos funciones de onda distintas que describen un electrón con energías distintas, también es posible que el electrón exista en un estado que se describe mediante una tercera función de onda. Esta nueva función de onda es (o más bien tiene un valor en cada punto del espacio que es) la suma de las dos primeras funciones de onda: una que describía un electrón en movimiento rápido y otra que describía un electrón en movimiento lento. Esto significa que un electrón individual en semejante estado se

mueve deprisa y despacio al mismo tiempo. Y no significa que tenga una velocidad intermedia a ambos extremos, sino que tiene esos dos estados distintos de movimiento, o energías, ¡a la vez!

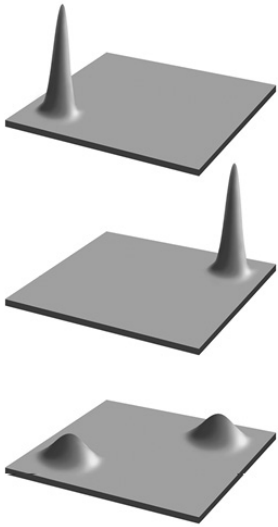
Pero aún hay algo peor, un electrón puede estar en un estado descrito por una función de onda que sea la suma de dos o más funciones de onda diferentes, cada una de las cuales describe un electrón en un lugar distinto. De modo que la función de onda combinada nos dice ahora que ¡el electrón tiene que estar en más de un lugar al mismo tiempo! No se preocupe, percibo su escepticismo. Al fin y al cabo sigo insistiendo en que la función de onda no es la entidad física en sí, sino una descripción matemática de ella. En cualquier caso, nunca vemos este extraño estado de cosas cuando observamos electrones. Siempre nos los encontramos en una única posición cuando los miramos, y con solo una de sus posibles energías cuando la medimos. De modo que este embrollo de la superposición tal vez no sea más que una mera curiosidad matemática después de todo, y no una propiedad de las partículas reales.

Por ejemplo, sería estupendo que la función de onda se limitara a describir una distribución estadística de los posibles estados de un electrón. Es decir, si quisiéramos medir mil electrones idénticos, todos ellos descritos por la misma función de onda superpuesta, entonces nos encontraríamos alrededor de la mitad de ellos en el primer estado y la otra mitad en el segundo estado. A lo mejor no deberíamos preocuparnos después de todo; en realidad, ninguno de los electrones se encuentra jamás en dos lugares a la vez cuando miramos.



Las ondas de luz irradiadas hacia las dos rendijas del Capítulo 1 son como olas marinas que se superponen al toparse con la costa. Al otro lado, cada rendija actúa como una nueva fuente puntual de luz que irradia ondas semicirculares hacia fuera. Entre ellas se formará una superposición que dará lugar al patrón de interferencia observado en la pantalla del fondo.

Pero, aguarde un minuto, ¿qué hay del patrón de interferencia en el truco de la doble rendija? ¡Eso era muy real, y se formaba incluso al lanzar átomos de uno en uno a través de las rendijas! De hecho, esta idea de la superposición de funciones de onda resulta ser la forma en que podemos explicarlo.



Distribución de probabilidad de un electrón encerrado en una caja. (Para simplificar las cosas, la caja se ha representado como una superficie bidimensional, de modo que el eje vertical se puede usar para plasmar la densidad de probabilidad (cuanto más alto es el pico, más probable es que el electrón esté ahí).
Arriba: El electrón se encuentra claramente en algún lugar de la esquina inferior izquierda.
Centro: El electrón se encuentra claramente en algún lugar de la esquina superior derecha.
Abajo: El electrón está en una superposición de estados y se encuentra en dos lugares a la vez. Esto significa que si abrimos en varias ocasiones la caja para buscar un electrón descrito mediante una función de onda con esta distribución, entonces la mitad de las veces lo encontraremos en la esquina inferior izquierda, y la otra mitad de las veces lo hallaremos en la esquina superior derecha. Por supuesto, la realidad es que nunca vemos un mismo electrón en dos lugares al mismo tiempo.

Explicación del truco de las dos rendijas

Usted ya sabe suficiente mecánica cuántica como para poder seguir lo que sucede en el experimento de la doble rendija. Quizá no le guste, pero en ese caso, tal como dije con anterioridad, se trata de una reacción muy natural y, de hecho, revela el desarrollo de una madurez para asimilar la inevitable naturaleza antiintuitiva de este asunto. No es necesario que se sienta cómodo con las conclusiones de la mecánica cuántica.

Cada átomo lanzado contra las rendijas se describe mediante una función de onda que evoluciona con el tiempo. Esta función de onda es probabilística por naturaleza y solo nos revela la posición probable del átomo. Es importante subrayar aquí que, aunque no podamos considerar que el minúsculo átomo se ha convertido de repente en una función de onda extendida, la función de onda representa el único medio que tenemos para seguir el recorrido del átomo desde el momento en que es lanzado hasta el momento en que impacta contra un punto específico de la pantalla.

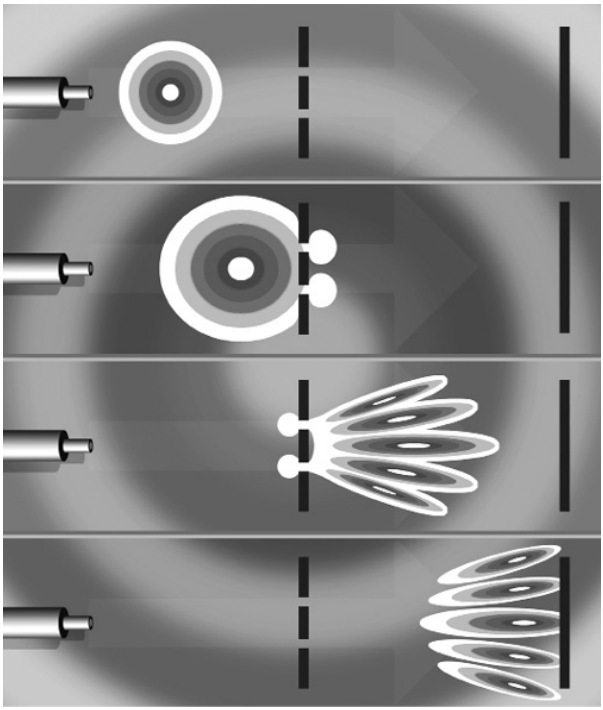
Al toparse con las rendijas, la función de onda (extendida) se escinde en dos, de forma que cada fragmento atraviesa una de las rendijas. Nótese que lo que estoy describiendo aquí es la manera en que cambia una entidad matemática, y que resolviendo la ecuación de

Schrödinger puedo decir qué aspecto presenta la función de onda en un instante determinado. Nunca sé qué está pasando en realidad, ni tan siquiera estoy seguro de que esté pasando algo en verdad, puesto que tendría que mirar para comprobarlo, pero en cuanto mirara, alteraría el resultado.

A medida que atraviesa ambas rendijas, la función de onda del átomo pasa a consistir en la superposición de dos partes, cada una de las cuales tiene la máxima amplitud en su rendija correspondiente. Ahora bien, si el estado del átomo se describiera mediante una sola de estas partes de la función de onda, entonces cabría afirmar categóricamente que atravesó esa rendija. Pero lo cierto es que la superposición de las dos partes significa que hay la misma probabilidad de que pasara a través de cualquiera de las dos.

Al otro lado de las rendijas, cada fragmento de la función de onda vuelve a extenderse, y ambas series de ondas se superponen de tal modo que su efecto combinado al llegar a la pantalla crea el característico patrón de bandas que se ve cuando hay interferencia entre dos ondas reales. Solo que ahora no estamos ante una onda real que se precipita contra la pantalla, sino ante una serie de números que arrojan la probabilidad de que una única partícula llegue a un lugar concreto.

Antes de que la partícula impacte contra la pantalla, la función de onda es lo único que tenemos para describir la realidad. La función de onda no es el átomo en sí, sino tan solo la descripción de cómo se comporta cuando no lo miramos. Y nos brinda toda la información que podríamos esperar conseguir sobre el estado del átomo si miráramos. Así que, teniendo en cuenta que solo estamos tratando con el aspecto de la función de onda en cualquier punto, y siguiendo las reglas sobre cómo se usa para predecir la probabilidad de que el átomo esté ahí y tenga ciertas propiedades, podemos entregarnos a la tarea con bastante tranquilidad. Casi todos los físicos trabajan de este modo. Esto se debe a que han perdido la esperanza de ser capaces de calcular qué está ocurriendo en realidad aplicando conceptos anclados en la mecánica newtoniana.



Izquierda: Cómo pensar en el truco de las dos rendijas con átomos. La función de onda del átomo está localizada en el espacio en cuanto sale de la pistola, pero se extiende a medida que viaja hacia las rendijas. De hecho, las curvas de nivel representan la distribución de probabilidad, no la función de onda en sí, que es una cantidad más difícil de visualizar incluso desde una perspectiva matemática. Las curvas de nivel se interpretan aquí igual que en un mapa del relieve de un terreno montañoso, donde las curvas interiores indican la probabilidad más alta de encontrar el átomo. A medida que la función de onda llega a las rendijas, empieza a derramarse por ambas a la vez. Al otro lado, los dos fragmentos de la función de onda forman una superposición con una distribución de probabilidad de un aspecto muy diferente (debido a la interferencia entre los dos fragmentos). Cuando la función de onda alcanza la pantalla se da una distribución tal que el átomo tiene una probabilidad elevada de alcanzar ciertos lugares y ninguna probabilidad de llegar a otros. Aunque el átomo solo se manifestará en un único lugar, si se hiciera el experimento de manera estadística con muchos átomos, cada uno de ellos con una distribución de probabilidad similar, los puntos de impacto formarían el patrón representado. Es importante señalar que esta figura tan solo representa la evolución a lo largo del tiempo de una cantidad matemática, y no el átomo físico. La mayoría de los físicos insisten en que es bastante erróneo pensar que la función de onda y el átomo se desplazan como entidades físicas independientes. De ahí que aún nos hallemos ante el problema de qué hace el átomo al toparse con las dos rendijas. En el Capítulo 6 comentaremos diversas maneras de tratar esta cuestión.

Seguramente a usted no le parezca suficiente. Al fin y al cabo, está muy bien olvidarse del átomo cuando no lo estamos mirando y tratar únicamente con las matemáticas, pero lo cierto es que una minúscula partícula localizada sale de la pistola atómica, de algún modo deja de comportarse como una partícula por unos instantes, y después vuelve

a transformarse en partícula una vez que llega a la pantalla. La ruta que ha tenido que seguir es algo que solo se puede entender si pensamos en una onda que atraviesa ambas rendijas a la vez. Lo único que podemos hacer para seguir el avance del átomo es calcular la función de onda. Pero el patrón de interferencia que se forma después de que muchos átomos hayan pasado a través de las rendijas es muy real. Lo más seguro es que alguna suerte de onda física esté atravesando las rendijas.

El problema aquí es que usted espera que yo le explique cómo atraviesa el átomo ambas rendijas usando imágenes y conceptos familiares para usted a partir de la experiencia cotidiana. Pero por desgracia no me es posible. Queramos o no, este misterioso comportamiento constituye una característica del mundo cuántico que debemos aceptar, por mucho que nos cueste creerlo. Es algo real, y aunque tenemos derecho a esperar una explicación racional, nadie la ha encontrado aún. Muchos físicos dirán cosas como: el mundo de los átomos y partículas menores está tan alejado de nuestras experiencias en el mundo macroscópico que no hay por qué esperar que las cosas se comporten en él de manera que podamos describirlo usando conceptos cotidianos. Sé que suena poco alentador, y hasta a excusa. Debería inquietarnos la manera en que se comporta el átomo, pero muchos de los físicos más eminentes creen que es un ejercicio peligroso y hasta inútil, y que es mejor dejar esa preocupación para los filósofos, ¡que no tienen nada mejor que hacer con su tiempo!

Puede que algunos físicos critiquen un libro no técnico como este, en el que se hace tanto hincapié en el misterio de la mecánica cuántica en lugar de subrayar su precisión y su capacidad para explicar tantos fenómenos. Bueno, esa parte vendrá más adelante. Pero, en lo que respecta al truco de las dos rendijas, ¿por qué no puedo limitarme a decir que el átomo se comporta de algún modo como una onda en propagación cuando atraviesa las dos rendijas y listo? Al fin y al cabo, si es así como se comportan los átomos, no hay más que decir. Ante los físicos que afirman no inmutarse con la mecánica cuántica, respondo insistiendo en que han perdido la sensibilidad ante sus implicaciones porque ¡están demasiado familiarizados con la materia!

A continuación describiré brevemente un instrumento llamado interferómetro, que realza la idea de la superposición (de un sistema cuántico que se encuentra en dos estados al mismo tiempo) en su

forma más pura y más desconcertante. Ya no podemos pensar ni siquiera en términos generales que el átomo se comporta como una onda física cuando no lo miramos. En lugar de lanzar átomos contra una pantalla con dos rendijas, se pueden lanzar de uno en uno a través de este instrumento[26]. Al entrar en el interferómetro, cada átomo se ve en la tesitura de tener que elegir entre dos caminos distintos, o brazos, cada uno de los cuales sigue una ruta muy diferente e independiente a través del aparato. La mecánica cuántica nos dice que, hasta que miremos, la función de onda del átomo se hallará en una superposición de dos «fragmentos» que discurren a lo largo de ambas rutas al mismo tiempo. En principio, las dos rutas pueden estar muy separadas entre sí, incluso en distintos extremos de la Galaxia, pero tenemos que seguir pensando que la función de onda recorre ambas rutas. Si al final los dos caminos vuelven a unirse, veremos una interferencia cuya forma demuestra que el átomo tuvo que viajar por ambas rutas a la vez.

Interferómetros de partículas

Los interferómetros son dispositivos que evidencian que una sola partícula puede recorrer dos rutas a la vez y que, cuando estas vuelven a juntarse, surge un patrón de interferencia o algún otro tipo de señal que demuestra que algo tiene que haber viajado por ambos caminos.

Los interferómetros se pueden usar con fotones, electrones o neutrones, y la forma en que la onda correspondiente a alguna de esas partículas se «divide en dos» una vez que entra en el dispositivo depende del tipo de partícula de que se trate[27]. Por ejemplo, los fotones se introducen en divisores de haces ópticos que se comportan como superficies semiespejadas. Cuando un fotón incide contra una de estas superficies dispuesta con una inclinación de 45 grados respecto de la trayectoria, tiene un 50% de probabilidades de atravesar en línea recta la superficie y continuar en la dirección que llevaba en un principio, y otro 50% de probabilidades de salir reflejado hacia una trayectoria situada en ángulo recto con respecto a la dirección de procedencia, que sería lo que ocurriría si se topara con dos rendijas en una pantalla y siguiera ambas rutas al mismo tiempo. La instalación de espejos adicionales a cada lado permite hacer que ambos caminos diverjan entre sí y que más tarde vuelvan a juntarse.

Como la intensidad del haz se puede reducir para asegurar que en cada instante determinado solo haya un fotón dentro del interferómetro, cada fotón individual se encontrará en una superposición de estados que lo hará recorrer los dos caminos separados al mismo tiempo, igual que las dos sendas del poema de Robert Frost. Estos dos ramales del interferómetro pueden distar entre sí lo que se quiera (en la práctica pueden estar separados por varios metros). Esto dificulta especialmente la concepción del fotón como una mera onda. Su función de onda parece consistir ahora realmente en dos trozos independientes.

Tal vez nos sintamos obligados a admitir que el fotón ha tenido que recorrer un camino o el otro, y no ambos a la vez. ¡Pero no es así! Los dos ramales del interferómetro confluyen más tarde y se vuelven a juntar, y la señal que emerge del interferómetro es el resultado de dos ondas en interferencia. Igual que en el truco de las dos rendijas, la interferencia se debe a que el fotón ha tenido que seguir dos caminos de distinta longitud. Lo que se ve solo se puede explicar si el fotón ¡recorre ambas rutas a la vez y acaba interfiriendo consigo mismo cuando emerge!

Por supuesto, si colocamos un detector a lo largo de uno de los ramales para ver si el fotón sigue esa ruta, entonces lo veremos en la mitad de las ocasiones, y el efecto de interferencia

desaparecerá porque ahora cada fotón habrá recorrido bien un camino o el otro.

Otra manera de decir esto mismo es que el patrón de interferencia se produce cuando las dos rutas son indistinguibles. Pero si introducimos un detector en uno de los brazos que haga rotar en 90 grados la polarización de la onda del fotón en ese ramal, entonces los dos caminos producirán fotones que ahora ya son distinguibles y el patrón de interferencia desaparece. Esto se debe a que ahora, cuando emerja cada fotón, tendremos información sobre qué ruta ha seguido. La versión de «opción retardada» del experimento consiste en tener el rotador de polarización apagado y activarlo solo después de que el fotón se haya dividido en sus dos componentes (al pasar por el divisor de haz o una superficie semiespejada). Si las dos rutas del fotón están polarizadas en vertical en un primer momento, entonces el dispositivo rotará la componente del ramal superior para conferirle una polarización horizontal. Por tanto, si detectamos que un fotón emerge del aparato polarizado en vertical, sabremos que ha tenido que viajar por el brazo inferior. Si, por el contrario, aparece polarizado en horizontal, entonces tendrá que haber pasado por el rotador de polarización del brazo superior. ¿Significa esto que en todos los casos los fotones solo recorren o bien un camino o bien el otro? Y, de ser así, ¿cómo adivinan los fotones que el rotador se iba a accionar después de que se dividieran en dos dentro del interferómetro? Porque resulta que si se deja el dispositivo rotador apagado todo el tiempo, ¡aparece el patrón de interferencia!

En 1982, los físicos Marlan Scully y Kai Drühl propusieron una ampliación aún más insólita de esta idea. Plantearon que incluso con un marcador de la ruta seguida, como el rotador de polarización, colocado en su sitio y en marcha, se puede borrar a posteriori la información sobre la ruta tomada por el fotón justo antes de su emergencia. Sugirieron colocar un «borrador cuántico» después de que ambos caminos vuelvan a confluir (digamos mediante una segunda superficie semiespejada). Puede que a usted se le ocurra, con razón, que en cuanto los dos caminos se vuelven distinguibles debido a la diferencia de orientación de su polarización, ya no se dará ninguna interferencia. Pero parece que al eliminar todos los signos (rotando la polarización otros 45 grados, de manera que ya no se pueda decir qué ruta siguió el fotón), el borrador es capaz de restablecer el patrón de interferencia. Esto parece increíble: no solo da la impresión de que el fotón sabe si el rotador está activo o no en un ramal, sino también que más adelante a lo largo del recorrido un borrador cuántico elimina la información de qué camino tomó.

Al final, Yoon-Ho Kim y sus colaboradores realizaron un experimento unos años atrás que confirmó la idea original de Scully y Drühl. ¡El borrador cuántico restablecía realmente el patrón de interferencia!

Los interferómetros evidencian que las partículas cuánticas pueden estar realmente en superposiciones de estado de dos lugares a la vez. Por supuesto, aunque no lo he dicho aquí, las partículas cuánticas pueden estar en superposiciones de otros estados, como girando en dos direcciones a la vez o teniendo dos o más energías o velocidades distintas al mismo tiempo. Y aunque sería tranquilizador decir que lo que en realidad está en superposición es la función de onda y no la partícula física que describe, algo tiene que viajar a lo largo de ambos ramales del interferómetro. Los físicos suelen usar un lenguaje contradictorio o descuidado para describir esta situación diciendo que hay dos haces dentro del interferómetro que interfieren entre sí. Pero ¿qué significa eso cuando describimos una sola partícula? La verdad es que no se puede explicar como es debido en términos no matemáticos.

Lo que sí sabemos es que el átomo siempre está descrito por una

única función de onda extendida por ambos ramales, y no por dos independientes. Aquí es donde fracasamos si intentamos imaginar las funciones de onda como ondas clásicas. Si una onda sonora se escindiera y viajara por dos rutas diferentes que volvieran a confluir al final, también deberíamos notar un efecto de interferencia (alterando ligeramente la frecuencia de una de ellas oiríamos «batidos» debidos al desfase con el que acaban las dos ondas). Sin embargo, en este caso la onda de sonido se escinde realmente en dos fragmentos. Si los dos ramales que conducen las ondas sonoras acaban en lugares separados, entonces los dos observadores oirán algo. Recordemos que en el caso del átomo solo uno de ellos llegará a ver un átomo individual, si les diera por buscarlo. Formalmente decimos que el átomo solo tiene una función de onda con dos trozos que describen cómo viaja por cada ramal, con independencia de lo apartados que estén entre sí. La función de onda se extiende por todo el espacio y vale cero en todas partes salvo en el interior de ambos ramales. El todo de la función de onda extendida se colapsa luego, cuando miramos, en una sola partícula real, bien dentro de un ramal o bien dentro del otro.

Carácter no local

Todos hemos oído alguna vez historias infundadas, pero enigmáticas, de gemelos idénticos que son capaces de percibir el estado emocional del otro aunque se encuentren a gran distancia. La idea es que en cierto modo estos gemelos están unidos a algún nivel síquico que la ciencia aún no ha desvelado. Afirmaciones análogas explicarían cómo nota un perro que su amo está llegando a casa, o cómo se supone que funcionan los muñecos de vudú en la magia negra. Debo subrayar que no menciono estos ejemplos como fenómenos con alguna conexión con la mecánica cuántica, ni creo que se den en realidad. Los menciono tan solo como ejemplos absurdos de un fenómeno llamado «no localidad». Lo interesante es que se ha demostrado fuera de toda duda el carácter no local del mundo cuántico, mediante un efecto que se conoce como «entrelazamiento».

Imaginemos un par de dados. ¿Qué probabilidad hay de que al lanzarlos salga un doble? Las matemáticas para calcularlo son muy claras. Para cualquier resultado concreto que salga con uno de los dados, habrá una posibilidad entre seis de que con el otro se obtenga

el mismo resultado. Por tanto la probabilidad de sacar dos dobles seguidos ascenderá a una entre treinta y seis (puesto que $1/6 \times 1/6 = 1/36$). Desde luego, esto no significa que al lanzar un par de dados treinta y seis veces haya justo una ocasión en que dos lanzamientos sucesivos salgan dobles, lo único que significa es que «en promedio» esa es la probabilidad[28]. De ahí se desprende, mediante la multiplicación de fracciones, que la probabilidad de sacar un doble con los dados diez veces seguidas viene a ser de ¡una entre sesenta millones! Esto quiere decir que si cada habitante de Gran Bretaña lanzara dos dados al aire durante diez veces seguidas, solo uno de ellos sacaría dobles en todas las tiradas.

Pero ¿y si yo le proporcionara a usted un par de dados que siempre arrojaran el mismo resultado? Primero quizá un seis doble, después un dos doble, y así sucesivamente. El número que salga será aleatorio, pero ambos dados estarán sincronizados. Lo dejaría muy sorprendido, así que usted intentaría explicar de forma racional cómo funciona el truco. Puede que estén trucados con algún ingenioso instrumento interno para controlar cómo deben caer y que ambos dados estén preprogramados para caer con la misma secuencia de números. Esto podría comprobarse con facilidad lanzando uno solo de los dados mientras mantenemos el otro sujeto, de tal modo que pierdan la sincronización, así que el truco ya no debería funcionar.

Si a pesar de esto siguen arrojando el mismo resultado, entonces la única explicación posible sería que vuelven a sincronizarse antes de cada lanzamiento mediante el intercambio de alguna señal a distancia. Sin embargo, una señal así estará sujeta a una condición previa: si los dados están muy alejados entre sí (por decir algo, uno en la Tierra y el otro en Plutón), ambos tienen que lanzarse de acuerdo con algún plan temporal establecido de antemano, puesto que no hay suficiente tiempo para que una señal viaje entre ellos.

Por supuesto, la operación simple de lanzarlos una vez y comprobar que arrojan el mismo resultado podría deberse a la suerte. Pero la repetición del proceso una y otra vez tanto en la Tierra como en Plutón, por ejemplo una vez cada minuto, y seguir comprobando que siempre caen igual implicaría algún tipo de conexión instantánea. Como es natural, podríamos asegurarnos de que no se hubiera producido ninguna señalización previa entre ambos para sincronizarse, de la misma manera que nos aseguramos de que no estaban preprogramados de un modo idéntico. Basta con lanzar el

dado situado en la Tierra una cantidad arbitraria de veces en el minuto inmediatamente anterior al comienzo del experimento.

La luz tarda varias horas en viajar entre Plutón y la Tierra, de modo que es imposible que los dados se comuniquen entre sí mediante alguna señal física conocida antes de cada lanzamiento. Si aun así continúan arrojando el mismo resultado, entonces tendremos que aceptar que se está transmitiendo alguna señal más veloz que la luz, algo que no admite ninguna ley conocida de la física.

En la teoría especial de la relatividad, Einstein demostró que ningún objeto o señal puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Así que podemos imaginar su incredulidad cuando se dijo que las partículas cuánticas son capaces de comunicarse entre sí de esta manera[29].

La exposición anterior con los dados es un ejemplo de lo que recibe el nombre técnico de conexión no local. Con esto me refiero a algo que ocurre aquí, y de manera instantánea afecta a algo que está allí. Esto es lo que tendría que pasar si dos dados continuaran sabiendo cómo caerá el otro con demasiada antelación como para que entre ellos se haya transmitido una señal. En la mecánica clásica esto no es posible. El concepto de causa y efecto no solo exige que las causas precedan siempre a los efectos, sino que también está sujeto a una condición estricta. Una de las lecciones más importantes que hemos aprendido con la teoría de la relatividad de Einstein es que si dos acontecimientos tales que uno es la causa del otro, están separados por cierta distancia, entonces también tienen que estar separados en el tiempo, sometidos a la barrera de la velocidad de la luz. Es decir, si alguien saliera herido de un accidente de coche, entonces las leyes de la física clásica determinan que su gemelo idéntico, situado a mil kilómetros de distancia, no podría saberlo (con independencia de la clase de mensaje síquico que pudieran enviarse entre ellos) más rápido que el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia que los separa (solo unas cuantas milésimas de segundo).

Ya nadie duda dentro de la física que la comunicación instantánea entre objetos distantes, o la deslocalización, es un rasgo general del mundo cuántico, y que se puede rastrear hasta la naturaleza de la propia función de onda. A la mayoría de los físicos no les preocupa demasiado porque, debido a la naturaleza probabilística inherente al mundo cuántico, la deslocalización cuántica nunca podrá usarse para enviar señales más rápidas que la luz, lo que violaría la teoría de la

relatividad.

No necesitamos el ejemplo hipotético de los dos dados mágicos para mostrar la deslocalización en acción. Fue una característica de la función de onda escindida en los dos ramales del interferómetro que vimos antes. Si los dos brazos se encontraran a años-luz de distancia, aún podríamos tomar la decisión de encender un detector después de que el átomo entrara en el interferómetro para comprobar si se encuentra en uno de los brazos[30]. Si detectamos el átomo es indispensable que la parte de la función de onda que está viajando por el otro ramal descienda al instante a cero porque ya no habrá ninguna probabilidad de que el átomo haya seguido esa ruta.

La propiedad recién mencionada del colapso no local de partes de las funciones de onda extendidas cuando de repente miramos qué está pasando en algún lugar recibe justo ese nombre: colapso de la función de onda.

Debo señalar que mi ejemplo de los dados mantiene una diferencia importante con respecto a lo sucede en mecánica cuántica. Si los dos dados mantuvieran algún entrelazamiento cuántico, entonces el lanzamiento de uno de ellos, tal como propuse hacer para descartar cualquier sincronización previa, siempre conllevaría la alteración inevitable del otro.

Entrelazamiento

Hasta ahora, en este capítulo he hablado sobre dos conceptos diferentes y bastante complejos: la superposición y la deslocalización. El primero establece que una partícula cuántica puede hallarse en una combinación de dos o más estados al mismo tiempo, mientras que el segundo dice que dos partículas cuánticas (o dos partes escindidas de una función de onda extendida de una misma partícula) pueden mantenerse de alguna manera en contacto por muy separadas que se encuentren. Ahora combinaré estas dos ideas para introducir un tercer concepto cuántico.

En mecánica cuántica, la idea de que dos dados permanezcan en contacto entre sí (en conexión no local) por muy separados que se encuentren se conoce como «entrelazamiento». Aunque el término lo usó por primera vez Schrödinger durante los primeros días de la materia, no se ha erigido en concepto fundamental de esta disciplina

hasta tiempos recientes.

Si dos partículas cuánticas interaccionan entre sí pueden volverse correlacionadas, en tanto que sus destinos quedarán entrelazados para siempre, por mucho que lleguen a separarse entre sí, hasta que una de ellas interaccione con un instrumento de medida. La consecuencia matemática de esto es que ambas podrían describirse mediante una sola función de onda unificada que contiene la información combinada y compartida de sus dos estados cuánticos. Ahora es posible que una de las partículas se sitúe en una superposición de estados, por ejemplo, si se topa con una doble rendija. Si esto sucede, la segunda partícula también se verá obligada a atravesar una superposición de distintos estados que depende de (o, dicho de un modo más técnico, está correlacionada con) cada una de las dos alternativas de la primera partícula. Ahora se dice que la función de onda describe un «estado entrelazado».

El ejemplo más conocido de esto se describió por primera vez en un artículo de Einstein y dos compañeros suyos, Borís Podolski y Nathan Rosen. Por supuesto, en aquel entonces Einstein estaba más preocupado por el concepto de indeterminación, con el que la mecánica cuántica insiste en que no podemos saberlo todo a la vez sobre una partícula cuántica. Sin embargo, veremos que el verdadero problema radicaba en el carácter no local del entrelazamiento.

El experimento EPR

En 1935, poco después de huir a Estados Unidos desde Alemania, Einstein se dedicó a desarrollar un experimento mental para esclarecer la insistencia de la mecánica cuántica en que no podemos considerar que una partícula tenga una posición bien definida a menos que la estemos viendo. Junto a Podolski y Rosen, Einstein llegó a un escenario que acabó conociéndose como «la paradoja EPR», por las iniciales de los tres autores del artículo. Explicado de manera llana, consideraron dos partículas cuánticas, como los fotones, generadas simultáneamente por una fuente común, y que se alejan entre sí con velocidades iguales y opuestas.

Si nos centramos en uno solo de los fotones, ahora sabemos que debemos considerarlo como una onda en propagación hasta que sea detectado. Estamos obligados a admitir esto porque sabemos que si se

topara con una pantalla con dos rendijas, entonces el punto donde impactara estaría determinado por el patrón de interferencia de su función de onda. (Recordemos que solo podemos ver el patrón de interferencia cuando tenemos muchos fotones idénticos pasando por las rendijas). Cada uno se comporta como una onda antes de ser detectado, y como una partícula en cuanto se detecta.

Einstein y sus colaboradores señalaron que lo interesante es el otro fotón. Si elegimos medir las propiedades ondulatorias del primer fotón, como la longitud de onda, entonces será como medir su cantidad de movimiento[31]. Y como los dos fotones tienen la misma cantidad de movimiento (aunque viajen en direcciones opuestas), entonces también conoceremos la cantidad de movimiento exacta del segundo fotón y podremos por tanto asignarle una longitud de onda precisa, lo cual equivale a decir que también se comporta como una onda.

Pero (y aquí está lo más brillante), si hubiéramos optado por medir la posición precisa del primer fotón, entonces se nos mostraría como una partícula localizada. En tal caso, también conoceríamos la ubicación precisa del segundo fotón en ese momento sin necesidad de mirarlo, puesto que tendría que haberse alejado una distancia equivalente al otro lado de la fuente. Por tanto, podríamos admitir que los atributos que asignemos al primer fotón dependen de lo que elijamos hacer con él y de cómo lo midamos. Al fin y al cabo, sabemos que alteraremos su función de onda al medir su posición, tal como vimos en el truco de las dos rendijas. Pero en ningún momento hemos tocado el segundo fotón. Se supone que podríamos haber esperado a que los dos se encontraran muy alejados para asegurarnos de que no causaríamos ninguna alteración en el segundo fotón. La conclusión es que, en principio, podríamos conocer también la posición exacta del fotón inalterado (naturaleza corpuscular) o su cantidad de movimiento (naturaleza ondulatoria) en cualquier instante dado sin necesidad de mirarlo. No importa que esto no se pueda hacer en la práctica, ya que tendríamos que haber efectuado al mismo tiempo las dos mediciones distintas del primer fotón, lo importante es que el segundo fotón ha tenido que tener en todo momento una posición y una cantidad de movimiento concretos.

Retomaré esta cuestión en el Capítulo 6, cuando hable sobre la insistencia de Einstein en lo que se denomina una «realidad objetiva», es decir, que no deberíamos tener que esperar a medir una propiedad

particular de un sistema cuántico para que esa propiedad sea real. Ahora se sabe que Einstein estaba equivocado en este detalle (véase el recuadro). La mayoría de los físicos dirían que ninguna partícula tiene siquiera una posición o una cantidad de movimiento definidos hasta que se mide. Aunque este punto de vista no es el único posible, lo que es indudable es que tiene que darse algún tipo de comunicación no local que informe de manera instantánea a la partícula inalterada de la clase de medición que acabamos de hacerle a su compañera.

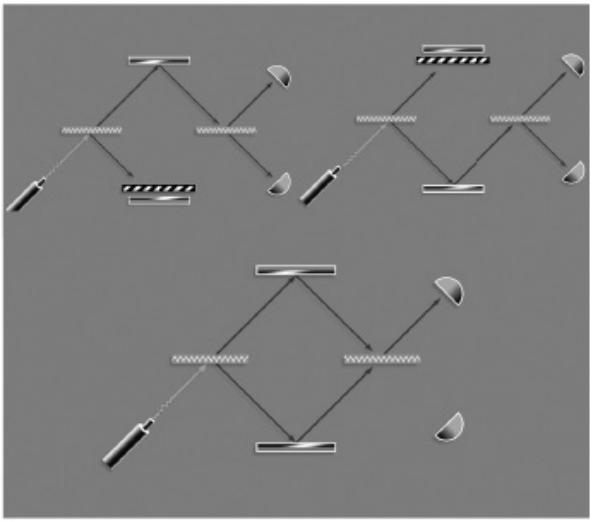
La paradoja se «resuelve» del siguiente modo: como las partículas han interaccionado, quedan descritas mediante una función de onda entrelazada, y sus destinos quedan unidos con independencia de lo lejos que lleguen a situarse. Al medir alguna propiedad de una de ellas, toda la función de onda se colapsa y el segundo fotón queda dotado al instante de la propiedad correspondiente. Fácil en realidad, ¿no?

Hoy, la deslocalización y el entrelazamiento cuánticos ya no son objeto de debate filosófico. Están aceptados como características cruciales del mundo cuántico. De hecho, el entrelazamiento de muchas partículas podría conducir al desarrollo de toda una nueva tecnología ni tan siquiera soñada por los pioneros de la cuántica.

El ladrón de joyas cuántico

Hay muchos ejemplos de cómo aprovechar la rareza cuántica para desarrollar nuevas aplicaciones, pero probablemente no haya ninguno tan ingenioso como la idea de las mediciones sin interacción. La siguiente situación ficticia es una variante de un concepto que se conoce como el experimento detector de bombas de Elitzur-Vaidman, el cual se ha comprobado en laboratorio.

Un ladrón de joyas internacional prepara su gran golpe. En el interior de una cámara acorazada de un banco de alta seguridad suizo se guardan varios diamantes de un valor incalculable. Acceder a la cámara acorazada no es trivial en absoluto, pero tampoco supone un reto insalvable para nuestro astuto ladrón. Sin embargo, una vez dentro se enfrentará a lo que parece ser una tarea imposible. Puede pasar varias horas dentro de la cámara mientras no intente tocar ningún diamante. Pero en cuanto empiece a manipular alguno, solo dispondrá de 30 segundos para efectuar el trabajo y cruzar la puerta de la cámara acorazada antes de que se cierre con él dentro. Como se necesitan 20 segundos para sustraer cada diamante, solo podrá robar uno de ellos. El problema es que la seguridad del banco ha colocado los diamantes mezclados con otros cien falsos que parecen iguales a los auténticos. Como solo podrá robar uno de ellos, deberá elegirlo con especial cuidado. Solo hay una manera de distinguirlos y consiste en alumbrar las piedras con una luz azul especial: las piedras falsas reflejarán la luz, mientras que las auténticas la absorberán.

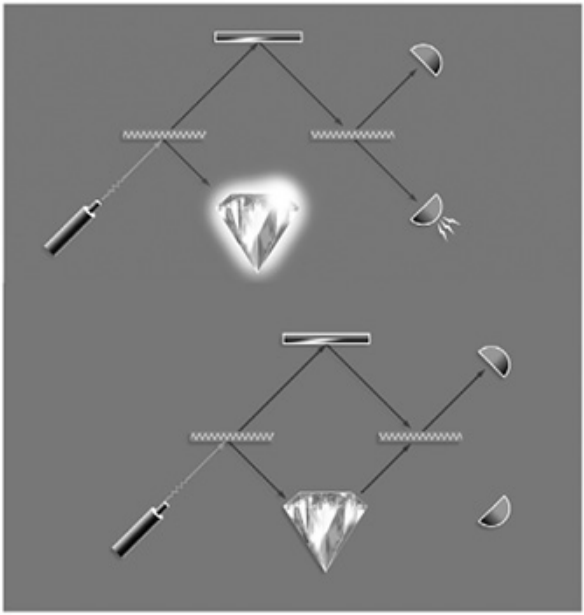


El interferómetro de Mach-Zehnder se compone de una fuente de fotones que los lanza de uno en uno, dos superficies semiespejadas para dividir y combinar el haz, dos espejos completamente espejados y dos detectores de fotones.
Arriba: Si se bloquea alguno de los dos espejos reflectores, solo queda una ruta viable (que el fotón tomará la mitad del tiempo) y la segunda superficie semiespejada garantiza que haya idéntica posibilidad de que el fotón llegue a cualquiera de los detectores.
Abajo: Si ambos espejos tienen la capacidad de reflejar, ambas rutas se pueden ajustar de manera que la interferencia entre ellas en la segunda superficie semiespejada sea tal que el fotón solo llegue al detector superior.

Pero hasta para esto ha sido ingenioso el banco suizo, porque en el instante en que un diamante auténtico absorba un solo fotón de luz azul, quedará destruido. Parece que los dueños de las piedras prefieren que nadie posea las piedras a que caigan en las manos equivocadas. Por supuesto, solo el banco sabe dónde se encuentran los diamantes verdaderos, así que no necesita someterlos a la prueba de la luz azul.

Tal vez parezca que no hay manera posible de que el ladrón triunfe. Las piedras que reflejen la luz azul de la linterna especial que adquirió en la tienda de accesorios para ladrones de joyas serán falsas y podrá rechazarlas, pero si elige un diamante auténtico no podrá estar seguro de ello sin destruirlo. Y sabe que solo tiene aproximadamente una probabilidad entre diez de atinar.

Pues bien, aquí es donde se podría usar un test cuántico no destructivo. Lo único que necesita el ladrón de joyas es un tipo de aparato llamado interferómetro de Mach-Zehnder (véase el diagrama). Antes de nada describiré los principios de este instrumento.



El espejo inferior del interferómetro lo sustituimos ahora por un diamante.
Arriba: Un diamante falso refleja la luz igual que habría hecho el espejo original. Las dos rutas interfieren y el detector inferior nunca lo registra.
Abajo: Un diamante auténtico absorberá el fotón y quedará destruido. Pero sabemos que esto constituye una medición de qué ruta ha tomado el fotón, y la mitad del tiempo que esté colocado un diamante real el fotón tomará la otra ruta, con lo que evitará el diamante. Como ahora no hay interferencia, el detector inferior tomará registros a veces. Cuando lo haga, ¡habremos deducido que estamos ante un diamante auténtico intacto sin que ningún fotón haya llegado a acercarse jamás a él!

Cuando un fotón entra en el interferómetro se topa con una superficie semiespejada que actúa como un «divisor de haz» que escinde la onda del fotón en dos componentes, una que se transmite a través del espejo y otra que se refleja en él. Ambas partes rebotan en espejos y vuelven a juntarse en una segunda superficie semiespejada. Si ambos espejos intermedios se colocan de la manera adecuada, la interferencia entre ambas rutas se puede ajustar de manera que el fotón emerja siempre en una dirección determinada. Por supuesto, la colocación de un detector junto a uno de los espejos centrales (totalmente reflectantes), de forma que podamos ver qué ruta sigue el fotón, destruiría la interferencia cuántica, como en el truco de las dos rendijas. En este caso, cada fotón seguirá una ruta o la otra, pero no ambas al mismo tiempo. En la mitad de los casos, la segunda superficie semiespejada garantiza que el fotón salga del instrumento en la misma dirección que habría llevado en caso de que no se hubiera efectuado medición alguna. Sin embargo, la otra mitad del tiempo, los fotones saldrán en otra dirección y accionarán el pitido de un detector externo. Así que, resumiendo, en ausencia de medición, el chivato nunca se activará, pero si se observa en uno de los espejos, el chivato se accionará la mitad del tiempo, puesto que no habrá ninguna interferencia destructiva que impida a los fotones salir en esa dirección.

El instrumento del ladrón de joyas se limita a sustituir el espejo inferior por los diamantes. Un diamante falso reflejará la luz y el chivato no suena jamás. Pero un diamante auténtico actúa como un aparato medidor. La mitad del tiempo el fotón seguirá la ruta que lo conduce hasta el diamante y, por tanto, lo destruirá. Pero no importa porque la otra mitad del tiempo el fotón recorrerá la otra ruta, donde se verá obligado a elegir en la segunda superficie semiespejada si saldrá reflejado hacia arriba, alejándose del chivato, o si será transmitido hacia el chivato. Así que, con cada diamante verdadero, el chivato sonará una cuarta parte del tiempo. Eso indica que se está analizando un diamante auténtico, pero uno que no se

destruirá ¡porque el fotón no se midió a lo largo de esa ruta! Nótese la sutileza aquí. Los diamantes falsos no implican mediciones porque a partir de ellos no adquirimos información sobre la ruta seguida.

En cuanto el ladrón oiga el chivato solo tendrá que agarrar ese diamante y salir corriendo de allí. Habrá efectuado una medición cuántica sin llegar a tocar el objeto que está midiendo. Me pregunto si habrá alguien en Hollywood interesado en hacer una película basada en esto. Me sentiría más que feliz interpretando el papel de físico cuántico convertido en ladrón de joyas, hábilmente asistido por Brad Pitt y George Clooney, por supuesto.

La paradoja EPR y el teorema de Bell

En su forma original, el experimento Einstein-Podolski-Rosen se concibió para demostrar que la mecánica cuántica brindaba una descripción incompleta de la realidad; que todos sus aspectos misteriosos se debían a que no entendíamos en su totalidad el mundo subatómico. Para situarlo dentro de su contexto histórico, los argumentos esgrimidos en el artículo EPR formaban parte de un largo debate mantenido durante las décadas de 1920 y 1930 entre Einstein y Bohr, los dos gigantes de la física del siglo XX. En aquel momento solo se consideraba una diferencia de opinión filosófica, ya que nadie sabía cómo realizar el experimento en la práctica.

Después, en 1964, un físico irlandés llamado John Bell propuso una manera de comprobar quién tenía razón de una vez por todas. El teorema de Bell, o la desigualdad de Bell, como se conoce a veces, representa un hito importante en el lento avance hacia una interpretación completa de la mecánica cuántica. De hecho, muchos lo consideran uno de los descubrimientos científicos más trascendentales de siglo XX. Muchas exposiciones de la mecánica cuántica que gozan de popularidad lo explican ampliamente en términos simples no matemáticos. Pero lo cierto es que el teorema de Bell no se puede describir en unas pocas líneas, ni sin grandes dosis de esmerada reflexión por parte del lector lego en la materia.

Sin embargo, yo perfilaré aquí la idea básica. Einstein defendía que la razón de que la medición de dos partículas del EPR revelara en ellas propiedades correlacionadas no era nada sorprendente. Al fin y al cabo, habían estado en contacto en el pasado (pues habían salido de la misma fuente emisora). Si sus propiedades venían impuestas desde un principio, no había por qué apelar a señales entre ellas más veloces que la luz. Estas propiedades bien definidas, y que la mecánica cuántica no describe en ausencia de una medición, se conocen como «variables ocultas», y no requieren ninguna deslocalización, la cual representaba un motivo natural de inquietud para Einstein. Pero ¿estaba Einstein en lo cierto? ¿Podían explicar esas variables ocultas la rareza cuántica?

El teorema de Bell desplazó la explicación de la naturaleza de la realidad cuántica desde el terreno de la filosofía al terreno de la física experimental[32]. Bell ideó una fórmula con la que se demuestra que si Einstein tenía razón, entonces tendría que haber una cantidad máxima de correlación entre las dos partículas. Es decir, como las partículas no pueden conocer de antemano qué medición se hará sobre cada una de ellas, esto limita su capacidad para trazar un plan conspiratorio entre ellas. Así que, aunque haya variables ocultas que definan de antemano las propiedades de ambas partículas, existe un límite para la sincronización entre los resultados de las mediciones efectuadas sobre ellas. Pero, por otro lado, si fueran correctos tanto la mecánica cuántica como el concepto de función de onda única que describe el estado entrelazado del par, entonces habría una cantidad mayor de correlación, o de cooperación, que ese máximo, lo que violaría la desigualdad de Bell.

No entraré en los detalles de qué tipo de prueba experimental se necesita para comprobar la desigualdad de Bell, no porque sea demasiado técnica, sino porque el análisis de los datos resultantes y la extracción a partir de ellos de las sorprendentes implicaciones que supone, precisan de algo más que unas cuantas páginas. Sin embargo, es bastante sencilla y aparece descrita con claridad y en detalle en otros lugares.

En 1982, un equipo de físicos de París dirigidos por Alain Aspect, consiguió al fin ejecutar el experimento EPR y comprobar el teorema de Bell. Usaron dos fotones emitidos desde un átomo de calcio que estaban correlacionados en lo que respecta a su polarización (en ángulo recto entre ellos). Sus resultados convencieron a la mayoría de la comunidad física de que se

viola la desigualdad de Bell y, por tanto, de que la mecánica cuántica con toda su rareza es la forma en que realmente se comporta la naturaleza. Si Einstein siguiera vivo no dudaría en admitir al fin su derrota. La mecánica cuántica es en realidad no local o, tal como prefería decir Einstein, implica «acción fantasmagórica a distancia».

Por supuesto, muchos físicos preferirán no hablar de esa deslocalización. Dirán que solo es necesaria si insistimos en buscar un mecanismo físico para explicar los resultados experimentales. Lo único que se puede afirmar, insistirán, es que la medición de cada partícula revela algún aspecto de la naturaleza de dicha partícula que no se conocía antes. No solo es imposible inferir a partir de la medición qué propiedades tenía la misma antes de ser medida, sino que ni siquiera tendría valores definidos para esas propiedades; más bien se encontraba en una superposición de todas las posibilidades a la espera de que una medición la obligara a configurar su mente y, en consecuencia, a través del entrelazamiento, ¡la mente de su compañera distante! Sin embargo, a pesar de estas pragmáticas garantías, la deslocalización no desaparece, solo que muchos prefieren relegarla a las matemáticas abstractas negando la existencia de una conexión física instantánea entre las partículas. Esta idea la expresa mejor el físico N. David Mermin, de Cornell:

> Creo que es justo afirmar que a la mayoría de los físicos no les causa inquietud [la confirmación experimental de la violación de la desigualdad de Bell]. Puede que una minoría sostenga que eso se debe a que la mayoría simplemente se niega a plantearse el problema, pero en vista del persistente fracaso para que emerja una nueva física a partir de este enigma durante el medio siglo transcurrido desde que Einstein, Podolski y Rosen lo inventaran, es difícil criticar su estrategia. El misterio [del experimento EPR] es que nos presenta una serie de correlaciones para las que sencillamente no existe ninguna explicación. Es probable que la mayoría niegue incluso esto, defendiendo que la teoría cuántica sí que ofrece una explicación. La explicación, sin embargo, no es más que una receta sobre cómo computar cuáles son las correlaciones. Este algoritmo computacional es tan bello y tan poderoso que puede, en sí mismo, adquirir el persuasivo carácter de una explicación completa.

Caología cuántica

Michael Berry, profesor investigador de la Real Sociedad Británica, Universidad de Bristol

El mundo cuántico se revela muy distinto del mundo de la física clásica que reemplazó. Los niveles de energía cuántica, las funciones de onda y las probabilidades parecen incompatibles con partículas newtonianas que se desplazan siguiendo órbitas bien definidas. Sin embargo, ambas teorías tienen que estar íntimamente relacionadas. Hasta la Luna se puede considerar una partícula cuántica, así que tiene que haber circunstancias (objetos más o menos grandes y pesados) para los que las predicciones cuánticas y clásicas concuerden. Pero el «límite clásico» es sutil, y gran parte de la investigación actual aspira a desentrañarlo.

Las dificultades que plantea el límite clásico resultan extremas cuando las órbitas newtonianas son caóticas. El caos es una inestabilidad persistente, y el movimiento es tan delicado, que aunque esté determinado de manera estricta, es imposible predecirlo en la práctica. Con el caos no hay ninguna regularidad, ninguna repetición precisa. La meteorología es un ejemplo con el que estamos familiarizados. Otro lo constituye la rotación errática de uno de los satélites del planeta Saturno: Hiperión, una roca con forma de patata y un tamaño similar a la ciudad de Nueva York.

El caos es problemático porque la manera en que se desarrolla una onda cuántica a lo largo del tiempo está determinada por los niveles de energía asociados. Una consecuencia matemática de la existencia de niveles de energía es que el transcurso del tiempo cuántico solo contiene movimientos periódicos con frecuencias definidas, lo opuesto al caos. Por tanto, no hay ningún caos en la mecánica cuántica, sino solo regularidad. Entonces ¿cómo puede haber caos en el mundo?

Existen dos respuestas. Una es que a medida que nos acercamos al límite clásico (a medida que los objetos se vuelven más grandes y pesados), el tiempo que tarda el caos en desaparecer debido a la mecánica cuántica se alarga cada vez más, y sería infinito en el mismísimo límite. Sin embargo, esta explicación no funciona porque el «tiempo de

eliminación del caos» suele ser sorprendentemente breve, de tan solo unas pocas décadas incluso para Hiperión, un periodo muy corto a escala astronómica.

La verdadera razón de que impere el caos es que los sistemas cuánticos grandes resultan difíciles de aislar del entorno. Hasta el «golpeteo de fotones» procedentes del Sol (cuya reemisión brinda la luz con la que vemos Hiperión) destruye la delicada interferencia que subyace a la regularidad cuántica. Este efecto por el que sistemas cuánticos de gran tamaño son tremendamente sensibles a influencias externas descontroladas, se denomina «decoherencia». En el límite clásico, la propia supresión cuántica del caos se elimina por decoherencia, lo que permite la reaparición del caos como característica habitual del mundo a gran escala.

Sistemas cuánticos menores se pueden aislar en la práctica, como átomos en campos magnéticos fuertes, moléculas en vibración intensa, o electrones confinados en «puntos cuánticos» con fronteras asimétricas. Por tanto, la decoherencia es irrelevante y no hay ningún caos cuántico, por más que los sistemas clásicos correspondientes sean caóticos. Con todo, esos sistemas cuánticos reflejan el caos clásico de varias maneras cuyo estudio sistemático constituye la caología cuántica.

Los niveles de energía de estados altamente excitados forman una serie de números que se pueden estudiar desde un punto de vista estadístico. Estas estadísticas (por ejemplo, la probabilidad que determina la separación entre niveles contiguos) son diferentes cuando hay caos y regularidad. De manera similar, los patrones de las ondas cuánticas que describen los estados son distintos. Un hallazgo sorprendente y casi misterioso es que la disposición de los niveles de energía en la caología cuántica está relacionada con uno de los problemas más insondables de las matemáticas, relacionado con patrones en los números primos.

23. Bueno, en honor a las matemáticas, debería decir en realidad que la superposición es una propiedad de todas las ondas que son solución de ecuaciones lineales. Si este enunciado no le aclara nada, ignórelo. ¡Solo pretendía defenderme de colegas pedantes!

24. Es decir, sin otros bañistas, no vacía de agua.

25. Espero que no le importe que al poner ejemplos de objetos cuánticos recurra indistintamente a átomos y electrones; sería más simple si me quedara tan solo con uno de ellos, pero entonces daría la impresión de que la rareza cuántica es exclusiva de ese único objeto.

26. En la práctica es más fácil usar partículas subatómicas o fotones de luz (véase el recuadro de la página 124), pero los átomos servirán para nuestra exposición.

27 1. Hoy en día, se realizan experimentos en física que utilizan interferómetros de átomos y hasta de moléculas.

28. De igual manera, al hacer dos lanzamientos de una moneda al aire no hay garantía de que salga una vez cara y una vez cruz por el mero hecho de que hay un 50% de probabilidades de que salga cada uno de esos resultados.

29. Esto no tiene nada que ver con la célebre cita de Einstein de que «Dios no juega a los dados». Recordemos que esa afirmación guardaba relación con la posibilidad de que el mundo cuántico estuviera regido por el azar y la incertidumbre. El hecho de que yo haya empleado un par de dados en mi exposición es mera coincidencia.

30. Por supuesto, se trataría de un experimento muy largo, puesto que tendríamos que esperar varios años a que el átomo recorriera el gigantesco dispositivo en el que las dos partes de su función de onda se encuentren de verdad a años-luz de distancia.

31. Recordemos lo que se dijo en el Capítulo 2 sobre la fórmula de De Broglie que relaciona la cantidad de movimiento de una partícula con su longitud de onda.

32 1. Para consultar una exposición detallada pero no técnica del teorema de Bell, recomiendo la obra de Dan Styer titulada *The Strange World of Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 2000). De hecho, Bell también desarrolló un segundo teorema (conocido en aquellos días como teorema Bell-Kochen-Specker) que resulta aún más difícil de explicar sin matemáticas formales. Los lectores valientes encontrarán más información sobre él en un artículo de revisión de David Mermin *(Reviews of Modern Physics,* vol. 65, 1993, p. 803).

5. Mirar y ser mirado

Los fundamentos de la mecánica cuántica que he esbozado hasta aquí tal vez le hayan parecido incomprensibles, incluso disparatados en ocasiones, pero el hecho es que, desde una perspectiva matemática y lógica, las reglas cuánticas son inequívocas y precisas. Y aunque muchos de los propios físicos cuánticos no se sienten cómodos trasladando las extrañas propiedades abstractas de la función de onda al mundo real, la estructura matemática y el formalismo de la mecánica cuántica han resultado demasiado exitosos y son demasiado exactos como para que generar muchas dudas sobre su capacidad para revelar verdades esenciales. Pero queda un último enigma que los físicos cuánticos han sido incapaces de explicar de manera satisfactoria. Muchos aducirán que se trata del aspecto más importante y, sin embargo, el más desconcertante de todos, que es: ¿por qué no podemos ver nunca en acción la función de onda, ni la realidad física que describe, cuando miramos? O dicho de otra manera, ¿por qué desaparece el patrón de interferencia cuando intentamos comprobar por qué rendija pasa el átomo? Estas cuestiones no se han respondido mediante la mecánica cuántica, y forman lo que se conoce como el problema de la medición cuántica.

Por todas partes vemos los efectos y el influjo de la función de onda con su naturaleza probabilística, la deslocalización, y la capacidad de formar superposiciones y estados entrelazados. De hecho, necesitamos estas propiedades para explicar la solidez de toda la materia, cómo brilla el Sol, incluso cómo se crearon los átomos que conforman nuestro cuerpo. Pero el problema básico persiste: ¿cómo se explica la forma en que una función de onda extensa se transforma de repente en una partícula localizada en cuanto intentamos observarla?

Los físicos cuánticos denominan a este misterioso proceso «el colapso de la función de onda». De hecho, yo mismo usé esa expresión en el capítulo anterior. Sin embargo, un descubrimiento bastante reciente ha convencido a muchos físicos de que esa terminología es innecesaria, pero nadie está seguro aún de si se ha resuelto o no el problema de la medición.

Empezaré hablando en primer lugar de a qué me refiero con

«mirar» algo.

Lo que ves es lo que obtienes

En el mundo cotidiano de los objetos macroscópicos, damos por hecho que el aspecto de un objeto coincide exactamente con cómo «es» en realidad. Por supuesto, estoy admitiendo que puedo confiar en mi vista, que no estoy bajo los efectos de sustancias alucinógenas y que la iluminación es suficiente. De hecho, para ver algo, es necesario que el objeto en sí emita luz o, lo que es más probable, que se refleje en él y yo la capte a través de los ojos. A continuación el cerebro interpretará la imagen que se forme en la retina.

Pero ¿le ha pasado alguna vez que la mera iluminación de algo lo haya distorsionado y alterado siquiera ligeramente, bien porque le haya provocado un leve calentamiento o un pequeño desplazamiento de su posición original? Como es natural, cuando observo una mesa o un coche, o incluso una célula viva al microscopio, la incidencia de los fotones de luz no ejercerá en ellos ningún efecto medible. Pero cuando tratamos con objetos cuánticos, que tienen un tamaño equivalente a los fotones, la cosa cambia. Recordemos la física que aprendimos en el colegio y la tercera ley de Newton: toda acción tiene una reacción igual y opuesta. Para «ver» un electrón habría que hacer rebotar en él un fotón. Pero en el momento en que captemos el fotón, el electrón ya no estará en el lugar donde se encontraría si no hubiera recibido el impacto del fotón.

Esta perturbación inevitable de una partícula cuántica cuando se mira suele usarse para explicar el problema de la medición cuántica, e incluso como base del principio de incertidumbre de Heisenberg. No solo se trata de una simplificación excesiva, sino también bastante errónea que crea una imagen de bolas clásicas rebotando unas contra otras. Aunque esta imagen fue crucial para demostrar la naturaleza corpuscular de la luz, tal como vimos en el Capítulo 2 cuando hablé del efecto fotoeléctrico y de los experimentos de esparcimiento de Compton con fotones de rayos X y electrones, no dice nada sobre la verdadera naturaleza cuántica de los fotones ni de los electrones.

Con todo, la alteración de un objeto al medir alguna de sus propiedades es fácil de entender. He aquí otro ejemplo sencillo. Medimos la temperatura del agua de una bañera usando un

termómetro. En un primer momento se producirá una pequeña transferencia de calor al termómetro hasta que alcance la misma temperatura que el agua, pero no es probable que esta pérdida minúscula de calor que experimenta el agua afecte a su temperatura (al fin y al cabo, habrá una pérdida de calor mucho mayor hacia el aire circundante que la que se invierta en calentar el termómetro). Pero si se mide la temperatura del agua en un pequeño tubo de ensayo sumergiendo en ella un termómetro se intercambiará una cantidad de calor considerable a menos que el termómetro ya se encuentre a la misma temperatura del agua. Por tanto, el termómetro no arrojará una medición precisa de la temperatura que tenía el agua antes de sumergir en ella el termómetro.

Por tanto, para conocer algo sobre un sistema es necesario medirlo, pero al hacerlo a menudo es inevitable alterarlo, y por tanto no se llega a conocer su verdadera naturaleza. Este problema se puede sortear por lo común en el mundo macroscópico, pero no en el reino de los objetos cuánticos.

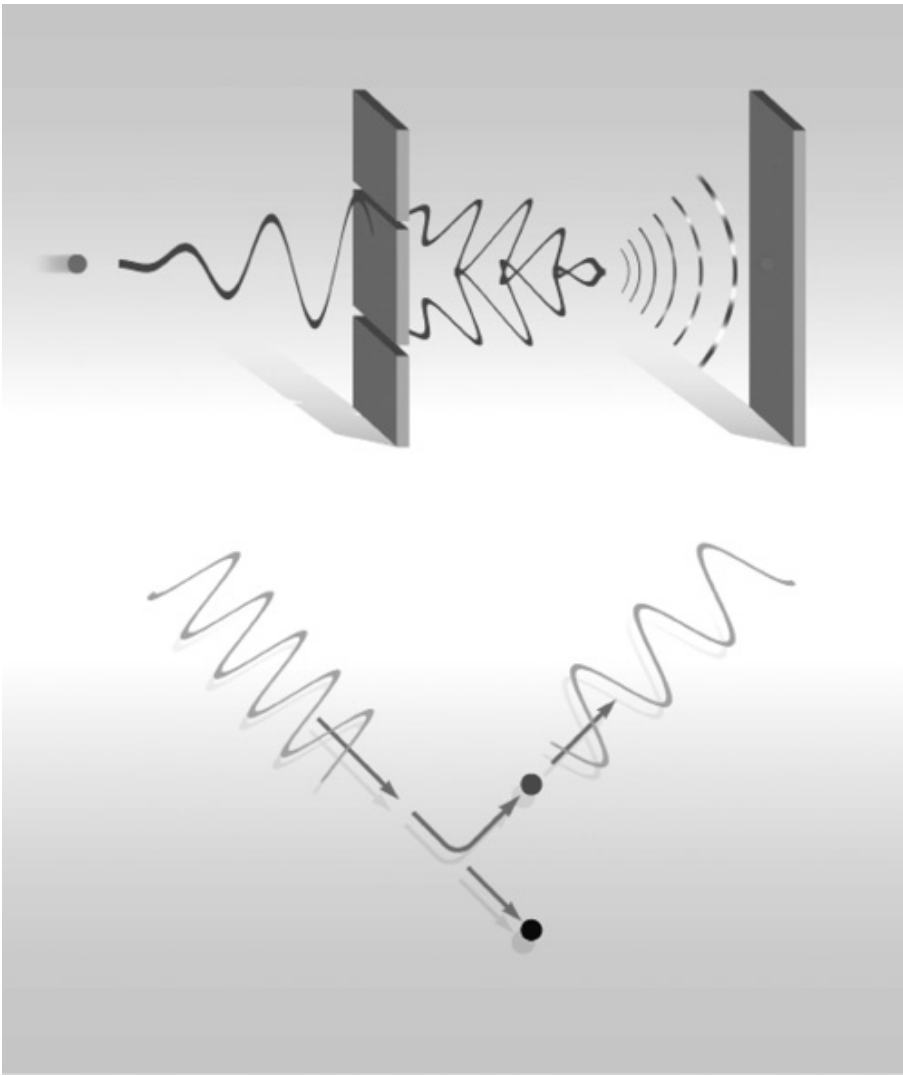
El microscopio de rayos gamma de Heisenberg

En el esparcimiento de Compton se lanza luz de rayos X sobre un blanco sólido (en el experimento original se usó una lámina de grafito) y se analizan los rayos X que salen reflejados. Así se descubrió que la frecuencia de rayos X cae ligeramente después de la reflexión. Arthur Compton interpretó correctamente (usando la relación de Planck entre frecuencia y energía) que se trataba de partículas que rebotaban unas contra otras; los electrones del blanco salen despedidos por el impacto y se llevan consigo parte de la energía de los fotones incidentes de rayos X.

Esta situación es la opuesta a la del experimento de las dos rendijas con átomos. En aquel caso, un átomo comienza siendo una partícula, se comporta como una onda al atravesar las rendijas, y por último acaba en forma de partícula sobre la pantalla. En el esparcimiento de Compton, el fotón empieza en forma de onda (con cierta frecuencia), se comporta como una partícula al chocar con el electrón, y al final se vuelve a detectar en forma de onda al medir su frecuencia. En ambos experimentos se usa la noción de la dualidad onda-corpúsculo de los átomos y de la luz.

Pero el mero hecho de hablar sobre la dualidad onda-corpúsculo no nos ayuda a comprender cómo ocurren los procesos. De hecho, la expresión en sí supone una vuelta a los primeros días de la teoría cuántica y es una vergüenza que aún se use al enseñar la materia en la actualidad.

El motivo por el que he vuelto a describir el esparcimiento de Compton estriba en que se parece bastante a un experimento mental ideado por Werner Heisenberg a mediados de la década de 1920. Con él consiguió inferir su famosa fórmula del principio de incertidumbre al subrayar cómo el acto de observar una partícula cuántica la aparta de su ruta original. Por desgracia para alguien con la genialidad de Heisenberg, estaba equivocado a este respecto. Niels Bohr se lo dijo con toda claridad en aquellos días, incluso lo dejó deshecho en lágrimas en cierta ocasión (estos tipos se tomaban muy en serio su trabajo). Pero a día de hoy, el ejemplo de Heisenberg sigue sembrando confusión y resulta inútil.



El hecho de ver un fotón comportarse como una onda o como una partícula depende de la clase de experimento efectuado. En el experimento de la doble rendija *(arriba),* el fotón empieza siendo una partícula localizada, se comporta como una onda cuando atraviesa ambas rendijas y pasa al otro lado, y al final vuelve a detectarse como una partícula localizada. En el esparcimiento de Compton *(abajo)* empieza siendo una onda con una longitud de onda determinada, se comporta como una partícula que choca contra un electrón, y por último se detecta de nuevo como una onda con una longitud de onda ligeramente más larga debido a la pérdida de cantidad de movimiento durante la colisión.

La idea guardaba relación con lo que él llamaba un microscopio de rayos gamma. Para ver algo a través de un microscopio normal, arrojamos luz visible sobre ese objeto que entonces la refleja hacia las lentes del microscopio. Pero este proceder no serviría para ver un objeto menor que la longitud de onda de la propia luz (unas cuantas

diezmilésimas de milímetro) puesto que ese objeto no podría reflejar la luz. Pero los rayos X y los rayos gamma son formas de radiación electromagnética con longitudes de onda mucho más cortas y, por tanto, se pueden usar para «ver» a escalas de longitud más pequeñas.

El microscopio de rayos gamma de Heisenberg era un instrumento hipotético que, según él, podría usarse para «ver» un electrón empleando la idea del espar- cimiento de Compton. Argumentaba, de forma correcta, que para concretar la posición del electrón, el fotón gamma tendría que colisionar contra él y rebotar a través de la lente del microscopio. Pero al hacerlo, propinaría al electrón un «empujón» que alteraría su cantidad de movimiento. Teniendo en cuenta aspectos como la resolución del microscopio y la longitud de onda del fotón, pudo inferir su relación de incertidumbre. Esta establece que el producto de ambos números, el que indica la incertidumbre de la posición del electrón y el que indica la incertidumbre de su cantidad de movimiento, siempre arrojará un resultado mayor que el valor de la constante de Planck. Esto significa que, aunque la constante de Planck es un número increíblemente minúsculo, lo crucial es que no vale cero. Por tanto, siempre se llega a alguna incertidumbre, ya sea en la posición de una partícula o en su cantidad de movimiento (o en ambas). Solo una de estas cantidades se puede medir con precisión, pero a expensas de nuestro desconocimiento de la otra.

El problema que plantean los fotones de rayos gamma es que sus cortísimas longitudes de onda se corresponden, usando la fórmula de De Broglie, con una cantidad de movimiento muy elevada. Así que, cuanta más precisión se logre al concretar la posición del electrón, mayor será el cambio que inevitablemente propinaremos a su cantidad de movimiento. Si intentamos «ver» el electrón con luz menos energética y, por tanto, más suave, necesitaremos una luz con una longitud de onda más larga. Pero en ese caso ya no podremos determinar la ubicación del electrón con tanta precisión.

Sin embargo, hemos visto que la relación de incertidumbre era una consecuencia de la relación entre las funciones de onda de posición y de cantidad de movimiento de la partícula. Aunque el ejemplo de Heisenberg podría parecer mucho más simple e intuitivo que hablar de funciones de onda, él descuidó un detalle crucial. Su deducción se basaba en la dualidad onda-corpúsculo de los fotones, pero trataba el electrón en todo momento como si fuera ¡una partícula puntual! En realidad tanto el electrón como el fotón deben tratarse en pie de

igualdad.

Entonces ¿a dónde nos lleva todo esto? Puedo expresarlo del siguiente modo: inevitablemente alteraremos algo como un electrón siempre que intentemos verlo, pero ese no constituye el origen del principio de incertidumbre, sino que es algo adicional a él. El principio de incertidumbre es una característica mucho más fundamental del mundo cuántico y solo se puede entender si se capta la naturaleza de la función de onda. Por tanto, el principio de incertidumbre no es un resultado de nuestra torpeza al intentar localizar el electrón cuando intentamos verlo. Al fin y al cabo, estoy seguro de que el mismísimo Isaac Newton no habría tenido ningún problema para admitir que alteraremos el estado de algo tan diminuto como un electrón al hacer rebotar en él partículas de luz[33].

Pues bien, ahora que he aclarado la idea equivocada de que el único problema que existe al medir algo se puede explicar usando la mecánica clásica, podemos reflexionar un poco más sobre el problema real, el cual resulta ser mucho más fundamental que el concepto de la dualidad onda-corpúsculo y no nos obliga a recurrir al principio de incertidumbre.

«Y entonces pasa algo más»

Cuando hablé del concepto del destino y de la predicción del futuro en el Capítulo 3, acabé diciendo que la mecánica cuántica nos rescata de la deprimente idea newtoniana de un universo determinista, una especie de mecanismo de relojería donde todo lo que ocurrirá en el futuro está trazado y, en principio, se puede determinar de antemano. En lugar de poder predecir el futuro con certeza resolviendo las ecuaciones del movimiento de Newton, solo nos ha quedado la capacidad de predecir las probabilidades de obtener diferentes resultados.

Esta es la esencia del indeterminismo cuántico. Pero ¿es la ecuación de Schrödinger, la que se emplea en el mundo cuántico en lugar de las ecuaciones de Newton, el verdadero origen de ese indeterminismo? La respuesta es, aunque tal vez resulte un tanto sorprendente, que no. De hecho, la ecuación de Schrödinger es perfectamente determinista: dada la función de onda en un instante temporal determinado puedo calcularla con exactitud para cualquier

momento del futuro resolviendo la ecuación. La noción de probabilidad solo interviene cuando dejamos a un lado el lápiz y el papel, apagamos la computadora, y realizamos predicciones sobre los resultados de una medición real usando lo que sabemos sobre la función de onda en el instante en que se realiza la medición.

A pesar de toda su utilidad y capacidad matemática, el formalismo de la mecánica cuántica no nos dice nada sobre cómo dar el paso desde la ecuación de Schrödinger hasta lo que vemos cuando realizamos una medición específica del sistema cuántico que estamos estudiando. Por esta razón, los padres fundadores de la mecánica cuántica idearon una serie de «postulados»: reglas que son un añadido extra al formalismo cuántico, que dan una receta sobre la manera de traducir la función de onda a respuestas concretas, u «observables», propiedades tangibles que se pueden observar, como la posición, o la cantidad de movimiento, o la energía de un electrón en un momento dado.

Uno de esos postulados con el que ya nos hemos topado aquí establece que la probabilidad de encontrar una partícula en un lugar determinado se obtiene al sumar los cuadrados de los dos números que definen el valor de la función de onda en esa posición. Esta regla no nos viene impuesta por las matemáticas, pero funciona. Los demás postulados también guardan relación con el tipo de mediciones que se pueden hacer y con lo que cabría esperar encontrar al efectuar un tipo particular de medición. Nos brindan una serie de instrucciones *ad hoc* sobre cómo actuar cuando hay que abandonar la ecuación «determinista» de Schrödinger y comparar sus predicciones con las observaciones.

El concepto de medición en mecánica cuántica es bastante difuso e indefinido. Así que los físicos adoptaron encantados la idea pragmática que lanzó Bohr, quien consideraba que una medición implicaba un proceso misterioso denominado el «acto irreversible de amplificación» que tiene lugar cuando un sistema cuántico interacciona con un instrumento de medida. Un detalle crucial es que el instrumento de medida se puede describir aquí mediante la física clásica y, por tanto, no es un objeto cuántico. Pero ¿cómo y por qué y cuándo ocurre ese proceso de medición? Cualquier aparato de medida, ya sea la pantalla del experimento de la doble rendija, un voltímetro, un contador Geiger[34], una máquina compleja con gran cantidad de botones y diales, o incluso un experimentador humano, también se

compone en última instancia de átomos. De modo que ¿dónde habría que situar la línea de separación entre lo que es un sistema cuántico regido por las reglas cuánticas, y lo que es un sistema clásico considerado un instrumento para medir?

El gato de Schrödinger

El mismo año que Einstein, Podolski y Rosen publicaron su famoso artículo en el que ponían de manifiesto lo que ellos consideraban el absurdo de ciertas propiedades de la mecánica cuántica (el indeterminismo y el carácter no local), Erwin Schrödinger también aportó una dosis considerable de rareza cuántica. Abordó el problema de la medición proponiendo uno de los experimentos mentales más conocidos de toda la física. Es increíble la cantidad de físicos que se han hecho un buen lío intentando poner de relieve o justificar la supuesta paradoja que planteó Schrödinger. Con el paso de los años, muchos han llegado a soluciones de un exotismo fabuloso, como si la mecánica cuántica no fuera lo bastante difícil de manejar ya de por sí.

Schrödinger se planteaba qué sucedería si se encierra un gato en una caja con un instrumento portador de un veneno letal y un núcleo atómico radiactivo. La partícula emitida por el núcleo al desintegrarse acciona un mecanismo que libera el veneno dentro de la caja, y el gato muere al instante. (A quienes luchan por los derechos de los animales les han asegurado que en realidad no se ha realizado ningún experimento de este tipo, puesto que se puede –y de hecho se ha logrado– conseguir el mismo resultado sin necesidad de usar ningún minino vivo).

El momento en el que un núcleo radiactivo se desintegra es otro de esos sucesos que no se pueden predecir con exactitud, ni siquiera en principio. Lo único que podemos decir es que habrá cierta probabilidad de que un núcleo determinado se haya desintegrado después de cierto tiempo. Lo que sí podemos decir, en cambio, es que en el momento en que cerramos la tapadera sobre el gato sano sabemos con seguridad que el núcleo no se ha desintegrado aún. Con posterioridad habrá que describirlo mediante una superposición cuántica. Es decir, su función de onda tiene que estar formada por dos partes que describan tanto un núcleo desintegrado, como uno no desintegrado. Por supuesto, la probabilidad de encontrar el núcleo en

uno u otro estado irá cambiando con el tiempo. Después de mucho tiempo, la parte de la función de onda que describe un núcleo no desintegrado constituirá tan solo una componente minúscula, y la probabilidad de encontrarnos el núcleo ya desintegrado ascenderá casi al cien por cien, tal como sería de esperar.

Hasta aquí todo bien. Pero en este punto Schrödinger siguió los dictados de la ley (cuántica). Como el gato también consiste en átomos, también debería describirse mediante una función de onda, muy compleja desde luego, pero una función de onda al fin y al cabo. Y como el destino del gato mantiene ahora una correlación muy intensa con la del núcleo radiactivo, debemos describir ambos a través de un estado entrelazado. Por tanto, la función de onda del gato también se escindirá inevitablemente en una superposición de dos estados: ¡uno que describa un gato vivo, y otra que describa un gato muerto!

Permítame recordarle una vez más el truco de las dos rendijas. A menos que miremos para ver dónde se encuentra el átomo, este no atravesará una rendija o la otra, sino que debemos considerar que pasó por ambas a la vez. Esto no es tan solo una maniobra matemática, sino que constituye la única manera de explicar el realísimo patrón de interferencia que observamos. El mismo problema se nos plantea con el gato de Schrödinger. Hasta que abramos la caja para comprobar el estado del gato, no podemos decir si está muerto o vivo (que es equivalente a decir si el átomo atraviesa una rendija o la otra), sino que tiene que estar ¡en ambos estados a la vez! Por supuesto, esto es ridículo. El gato tiene que estar vivo o muerto, y el mero acto de abrir la caja no puede influir en el resultado. ¿No será más bien que ignoramos lo que ya ha pasado (o lo que aún no ha pasado)? Pues bien, esto fue precisamente lo que apuntó Schrödinger.

Y si usted coincide con Schrödinger en esto, entonces debo preguntarle en qué nos estamos equivocando. ¿Por qué el gato (o «la compleja colección de partículas cuánticas», como preferiría llamarla yo) no se ha visto forzado a una superposición a través de su entrelazamiento con el estado superpuesto del núcleo radiactivo?

Bohr y Heisenberg no decían que el gato estuviera realmente vivo y muerto a la vez. Sino que insistían más bien en que ni siquiera se puede afirmar que el gato tenga una realidad independiente hasta que se abra la caja para comprobarlo! (y esto ha sido aceptado por la mayoría de los físicos desde entonces). Su razonamiento era que todo

el tiempo que la caja permanece cerrada sencillamente no tenemos ni idea sobre el verdadero estado del gato. Lo único que tenemos para guiarnos es la función de onda, y esta no es más que un conjunto de números. Como no podemos describir la realidad a falta de una medición, ni siquiera lo intentamos. Solo cuando estemos a punto de abrir la caja podremos usar la función de onda para predecir la probabilidad de encontrar el gato vivo o muerto. Y la repetición de este experimento muchas veces revelará que esas predicciones son correctas (igual que habría que lanzar una moneda al aire muchas veces para confirmar el 50% de probabilidades estadísticas de que salga cara o cruz).

Pero ¿y si pusiéramos un voluntario humano dentro de la caja en lugar del gato? Vale, en este caso podríamos usar una sustancia no letal, sino que se limite a dejar inconsciente al voluntario[35]. Sin duda, una vez que abramos la caja no podremos convencer al voluntario de que atravesó un estado de consciencia e inconsciencia al mismo tiempo antes de dejarlo salir. Si lo encontramos consciente contará que, aparte de estar un poco nervioso, se sintió bien durante todo el proceso. Y si lo encontramos inconsciente, entonces, al reanimarlo, tal vez cuente que oyó accionarse el dispositivo diez minutos después de que cerraran la caja y que al instante empezó a sentirse aturdido. Lo siguiente que sabrá es que lo reanimaron con sales aromáticas.

No sé usted, pero yo solo soy capaz de tratar con probabilidades para resultados vivos o muertos; puedo someter esto a mi ignorancia y simular que no se trata de nada mucho más serio que el hecho de no saber qué hay dentro de los regalos navideños antes de desenvolverlos. Hasta podría estar dispuesto a dejar de lado la cuestión de los gatos vivos y muertos al mismo tiempo, antes de recurrir a una inútil valoración metafísica. Pero ¿qué ocurre con esa tercera opción, la posibilidad de encontrar el gato en el estado un tanto incómodo de que esté vivo y muerto a la vez, una opción sobre la que el formalismo cuántico se muestra tan claro? Los postulados cuánticos esquivan el dilema estableciendo que solo se permiten resultados «razonables» para las mediciones. Por supuesto, todo esto se expresa mediante la jerga apropiada, pero lo cierto es que hasta hace poco nadie entendía realmente qué ocurre con esos estados intermedios del «gato de Schrödinger» (tal como han acabado conociéndose).

Muchas discusiones, incluso modernas, sobre la medición cuántica

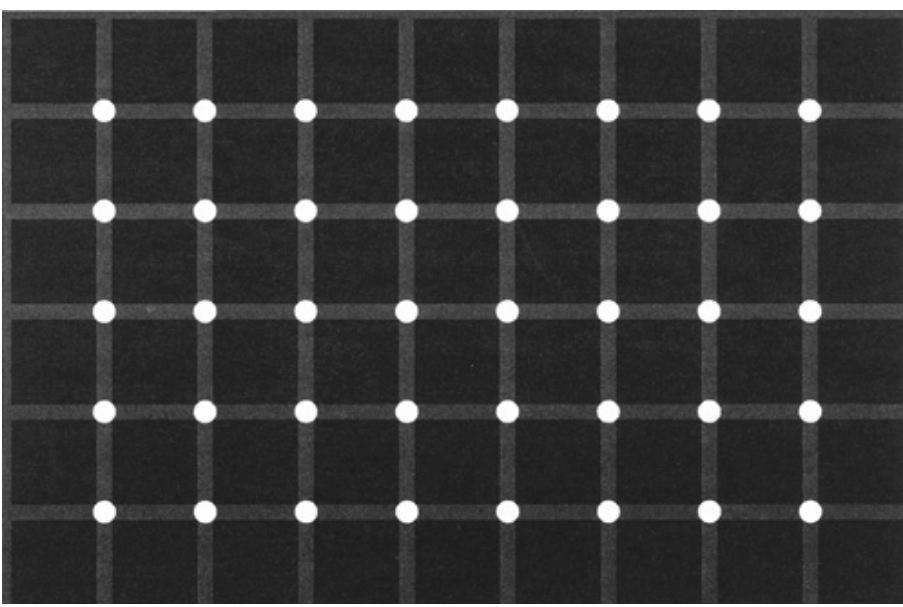
no reconocen que es posible que la paradoja del gato de Schrödinger se haya resuelto al fin. Consideran el acto de abrir la caja como el momento de la «medición» que colapsa la superposición y da lugar a un resultado concreto. En cierta época estuvo incluso de moda decir que toda medición necesita un observador inteligente, consciente. Al fin y al cabo, como nadie sabía dónde situar la frontera entre el terreno cuántico de las funciones de onda y las superposiciones, y el terreno clásico de los resultados concretos al efectuar mediciones, entonces tal vez debía ponerse una frontera tan solo cuando fuera necesario. Como incluso el aparato de medir (detector, pantalla, gato) no es más que un conjunto de átomos y debería comportarse como cualquier otro sistema cuántico, aunque uno muy grande, el único momento en el que estamos obligados a abandonar la descripción cuántica es cuando tomamos el registro en nuestra mente consciente. (Y sí, sé que el gato también es consciente, pero los defensores de esta concepción esgrimían que no estaba doctorado y, por tanto, ¡no estaba cualificado para ser observador!). Aún sigue bastante extendida, sobre todo fuera de la física, la idea de que como no comprendemos del todo la mecánica cuántica y tampoco entendemos de dónde sale la consciencia, ambas cosas tienen que estar relacionadas.

Siempre me ha sorprendido la cantidad de partidarios eminentes que ha tenido esta concepción. Uno de los principios básicos de la mecánica cuántica es el hecho de que los resultados de las mediciones están definidos, no solo por las propiedades del sistema cuántico objeto de estudio, sino por el propio acto de medir en sí. Muchos han llegado incluso a afirmar que no tiene sentido decir algo sobre el sistema cuántico sin incluir también en la discusión el instrumento de medir. Pero situar la línea divisoria entre lo medido y el medidor al nivel de la consciencia humana equivale a lo que en filosofía se denomina solipsismo: la idea de que el observador es el centro del universo, y de que todo lo demás solo es fruto de su imaginación.

De este modo, lo que el voluntario inmerso en la caja afirme haber sentido antes de abrir la tapadera, no tiene relevancia. Lo único que importa es que para mí, que estoy fuera de la caja, permanece en una superposición cuántica hasta que yo mismo abro la caja, con lo que mi consciencia impone el colapso de la función de onda en una u otra alternativa.

No me diga el resultado

Durante una conversación reciente con mi hermano sobre mecánica cuántica y fútbol (¿acaso existe algo más?), me habló de una sensación seguramente familiar para muchos de nosotros que se parece bastante al papel del observador en mecánica cuántica. Verá, ambos somos seguidores de toda la vida del Leeds United[36], y él siempre se ha preguntado si en caso de grabar en vídeo un partido del Leeds y sentarse más tarde a verlo sin conocer el resultado, entonces, para él, el partido ni siquiera tendría aún un resultado. Pero si llevamos la interpretación estándar de la mecánica cuántica a su conclusión lógica, entonces parece decirnos que no todo depende de que él ignore el resultado final, esa información que circula «por ahí» y que conocen millones de personas. Solo después de que él haya visto el final del partido se colapsa para él la superposición de todos los resultados posibles en el resultado único que él mide: el resultado que ve.



Esta sencilla ilusión óptica ilustra de manera aproximada cómo afecta a un sistema cuántico el acto de medir. Si fijamos la vista en cualquiera de los círculos blancos notaremos que aparecen y desaparecen puntos negros en algunos de los círculos de alrededor. Pero si dirigimos la vista hacia uno de esos puntos negros, vuelve a ser blanco de inmediato. Nunca pillamos un punto negro en acción. Como es natural, el funcionamiento de esta ilusión no tiene nada que ver con la mecánica cuántica, pero me parece una analogía bastante buena.

Sin embargo, hasta que me llame y me cuente el resultado,

suponiendo que yo aún no lo conozca, mi hermano estará, para mí, en una superposición en la que conoce todos los resultados posibles. Al recibir la noticia a través de él, habré realizado una medición efectiva de su estado cuántico y habré forzado el colapso de la superposición de las distintas versiones alegres y decepcionadas de mi hermano en una sola.

Las palabras de Julie resuenan de nuevo en mis oídos mientras escribo esto. Pero tenía que estar de acuerdo con ella en que todo esto no son más que «¡un montón de sandeces!». Prefiero pensar que hay una realidad objetiva ahí fuera que existe con independencia de si yo miro o no. Por poner un ejemplo más sólido: un núcleo de uranio radiactivo enterrado en el suelo emitirá una partícula alfa que puede dejar un rastro visible de defectos en la red cristalina de la roca. Da igual si miramos la roca hoy, dentro de cien años o nunca. El rastro seguirá ahí. ¿Y si la roca está en Marte y ningún observador consciente llega a encontrarla jamás? ¿Permanecerá en un estado de limbo en el que tendrá y no tendrá marcas grabadas en su estructura? Está claro que en todo momento se tienen que estar efectuando mediciones de alguna manera, y los observadores conscientes, lleven o no batas blancas de laboratorio, no pueden influir en ellas. La definición correcta es que se considera que se ha efectuado una medición siempre que se registra un «suceso» o «fenómeno». Y podría tratarse de algo que percibamos, si queremos hacerlo, más tarde.

El enunciado anterior tal vez suene tan obvio y razonable que habría que perdonar a quien se pregunte cómo puede haber físicos cuánticos tan estúpidos como para defender la idea contraria. Pero, una vez más, si hemos aprendido algo sobre la mecánica cuántica es que buscar una explicación racional es un ejercicio fútil. Muchos grandes pensadores se han planteado las cuestiones relacionadas con la medición cuántica y la mayoría de las distintas conclusiones a las que han llegado no son tan fáciles de refutar.

A lo largo de los años he mantenido numerosos debates con un compañero mío que es físico teórico, Ray Mackintosh, con quien no siempre estoy de acuerdo, pero casi siempre admito que sus observaciones son válidas. Las «discusiones» más interesantes solemos tenerlas en bares de noche cuando ambos estamos fuera en congresos de física nuclear en los que coincidimos. (Ese es el escenario habitual de la mayoría de las conversaciones profundas de este tipo mantenidas entre los físicos teóricos que no disfrutan del «placer» de los físicos

experimentales de tener turnos de noche en el laboratorio). Mackintosh objeta lo siguiente cuando alguien critica la idea de que nada existe hasta que se mide (y su función de onda se colapsa). Por supuesto, el electrón o el átomo o la Luna existen antes de medirlos. Todos los objetos, ya sean microscópicos o macroscópicos, tienen muchas propiedades definidas (es decir, cantidades que no se encuentran en superposiciones de más de un valor), como la masa o la carga eléctrica. Estas cosas no entrañan ninguna incertidumbre. Así que el mero hecho de tener que basarnos en la función de onda antes de efectuar una medición no implica que el objeto que describe no sea real. Por supuesto, de algunas de sus propiedades, como en qué lugar se encuentra o qué energía tiene con exactitud, no podemos decir que tengan valores definidos, pero esa es precisamente la naturaleza de los objetos cuánticos. No deberíamos menospreciar su existencia tan solo porque no podamos hacernos una idea mental de cómo son en realidad.

Dos estadios del problema de la medición

Entonces ¿qué es una medición? ¿A qué nos referimos con una «observación»? ¿Y dónde está esa transición mágica que va de la función de onda a la realidad? Una cosa sí sabemos: una medición tiene que implicar primero una interacción de algún tipo entre un aparato de medida, que aún no he especificado, y un sistema cuántico. Este último podría encontrarse hasta ese mismo instante en una superposición de distintos estados correspondientes a diferentes resultados posibles de la cantidad que se está midiendo. Esta interacción conducirá inevitablemente a un estado entrelazado de un sistema y el aparato externo de medida, lo que forzará a este último a una superposición compuesta por estados, resultado de medir todos los distintos valores posibles de dicha cantidad al mismo tiempo. ¿Y entonces qué?

Analicemos con un poco más de atención la disposición del interferómetro de partículas del capítulo anterior. Recordemos que la función de onda de un solo átomo se escindirá, al entrar en el dispositivo, en dos componentes, cada una de las cuales viajará por uno de los ramales. Y mientras tengo que describir el átomo mediante una función de onda, sé que está pasando algo extraño, puesto que

veo una señal de interferencia real al otro lado. También sé que si miro a través de una ventana abierta en uno de los ramales del interferómetro para comprobar si algún átomo está viajando por ese camino, entonces detectaré la mitad de los átomos. Pero entonces, por supuesto, el patrón de interferencia desaparecerá.

Para simplificar las cosas asumiré que mi detección del átomo se produce al abrir un pequeño vano en el ramal y ver un destello minúsculo cuando la luz se refleja en el átomo que pasa. Entonces ¿qué sucederá si decido cerrar los ojos? En este caso no sabré qué camino siguió el átomo; ¿significa esto que reaparece el patrón de interferencia? Esto implicaría que mi acto físico de mover los párpados determina el resultado del experimento. No parece un argumento muy convincente. Lo que se torna evidente ahora es que la medición tiene que estar ocurriendo de alguna manera porque he abierto el vano y he dejado que entre la luz e interaccione con los átomos. La interferencia desaparece tenga o no los ojos abiertos. Por supuesto podría argumentarse que la señal de interferencia al final constituye aún una posibilidad (una de tres en realidad: o el átomo se detectó en el ramal, o no se detectó y entonces tuvo que pasar por el otro brazo, o se detectó –mediante la luz que entró por el vano– y no se detectó al mismo tiempo). La tercera de estas opciones equivale al estado del gato de Schrödinger (es decir, la opción en la que estaba vivo y muerto al mismo tiempo) y da lugar a la señal de interferencia en el interferómetro. Por supuesto, nunca veré esta opción al abrir los ojos, y los defensores de la idea del observador consciente seguirán afirmando que el acto de ver, o no ver, el átomo es lo que en última instancia elimina la opción que genera la interferencia.

El problema se ve con más claridad si nos aseguramos de que el destello de luz debido al paso de un átomo por delante del vano deje un registro permanente en un instrumento colocado fuera del interferómetro. Este hará ahora la misma función que el gato de Schrödinger dentro de la caja. ¿Es capaz ese instrumento de existir en una superposición de registrar y no registrar un destello?

En un dispositivo con un interferómetro de átomos, la función de onda del átomo se ve obligada a entrar en una superposición de viajar a lo largo de ambos ramales al mismo tiempo. Pero si abrimos un vano para comprar qué ruta ha seguido, la obligamos a decidirse por una sola. Si vemos el átomo, entonces colapsamos al instante a cero la componente de la función de onda que recorre el otro brazo. Y aunque no lo veamos, seguimos obligándolo a salir del terreno cuántico para convertirse en una partícula definida que ahora viaja a través del otro ramal.

Resumiendo, podemos identificar dos cuestiones distintas en relación con el problema de la medición:

1) ¿A qué se debe que nunca veamos superposiciones de los estados macroscópicos distinguibles (como gatos vivos y muertos al mismo tiempo, e instrumentos que registran y a la vez no registran señales)? Al fin y al cabo, sí vemos los efectos de esa superposición en el interferómetro cuando el vano está cerrado, y por supuesto, en el experimento de la doble rendija. Pero en esos casos se trataba de estados que afectaban a átomos individuales.

2) Aunque hubiera alguna manera de quitar de en medio esos estados de gato de Schrödinger antes de que miremos, ¿no sigue siendo necesario el colapso de la función de onda para eliminar todo

el resto de opciones posibles salvo la que en realidad acabamos observando? De ese modo, el gato de Schrödinger podría estar vivo, muerto o ambas cosas. Eliminar esta última opción –la de ambas cosas a la vez– tampoco sirve para revelarnos cómo se descarta una de las otras dos posibilidades cuando abrimos la caja.

Decoherencia

Durante las décadas de 1980 y 1990 se esclareció la primera parte del problema. Los físicos lograron comprender qué tiene que estar pasando cuando un sistema cuántico inicialmente aislado, como un solo átomo, que vive feliz en su superposición, pasa a estar entrelazado con un objeto macroscópico. Resulta que la superposición de diferentes estados impuesta a ese sistema complejo formado por un billón de billones de átomos simplemente no se puede mantener y desaparece muy deprisa, es decir, entra en decoherencia. Una manera de concebirlo consiste en decir que la delicada superposición se pierde de forma irremediable entre la cantidad descomunal de otras superposiciones posibles debido a las diferentes combinaciones de interacciones viables entre todos los átomos del sistema macroscópico. Recuperar la superposición inicial es como intentar desbarajar un mazo de cartas de forma que las cartas de cada palo queden juntas, solo que lo otro sería mucho más difícil.

La decoherencia es un proceso físico real que ocurre en todas partes en todo momento. Se produce siempre que un sistema cuántico deja de estar aislado de su entorno macroscópico circundante y su función de onda se entrelaza con el complejo estado de ese entorno. Puede pasar con cualquier cosa, desde una pantalla fotosensible o un dispositivo electrónico hasta las moléculas del aire de alrededor. Si el acoplamiento a ese entorno «exterior» es lo bastante intenso, entonces la delicada superposición inicial se pierde con rapidez. De hecho, la decoherencia es uno de los procesos más veloces y eficaces de toda la física, y es precisamente esa enorme eficacia la responsable de que se haya tardado tanto en descubrirla; es ahora cuando los físicos están aprendiendo a controlarla y estudiarla. En el Capítulo 10 describiré algunos de los sorprendentes experimentos que se han realizado a lo largo de los últimos años para ver la decoherencia en acción.

En física se dice técnicamente que la función de onda del entorno

pierde todos los restos de las correlaciones de la fase inicial entre sus dos partes entrelazadas. Para expresarlo de una manera más animada bastaría con decir que en cuanto una superposición cuántica se entrelaza con el mundo exterior, desaparece toda la rareza y se pierde tan deprisa que nunca llegamos a verla en acción.

El proceso de decoherencia sigue siendo un campo de estudio activo y aún no se entiende en su totalidad. Pero al menos podemos empezar a dar sentido a la primera parte del problema de la medición. La razón de que nunca veamos el gato de Schrödinger vivo y muerto al mismo tiempo estriba en que la decoherencia se produce dentro de la caja mucho antes de abrirla. Esta ni siquiera se debe al gato, sino que ocurre mucho antes, en el dispositivo que aloja el núcleo radiactivo y el veneno. Ellos son los que conforman el entorno macroscópico que circunda más de cerca el núcleo radiactivo.

Otro ejemplo en el que podemos aplicar la idea de la decoherencia es el caso en el que un detector registra si un átomo se encuentra dentro de un ramal del un interferómetro, o si está pasando a través de una sola de las dos rendijas. Aquí la explicación es más fácil. Para conseguir información sobre la ubicación del átomo, el detector debe acoplarse a la función de onda del átomo, y el entrelazamiento da lugar con rapidez a la decoherencia. Nótese que hablé de la «función de onda del átomo» y no «del átomo» puesto que si el detector no registra nada, significaría que el átomo siguió el otro camino. Esto también es una «medición» que destruirá el patrón de interferencia. De modo que, aunque el detector y el átomo no necesiten entrar jamás en contacto físicamente en un sentido clásico, sigue habiendo entrelazamiento con la función de onda.

Si no se coloca ningún detector detrás de una de las dos rendijas, será la pantalla lo que cause la decoherencia. Solo que entonces será demasiado tarde para detener la formación del patrón de interferencia; las dos partes de la función de onda del átomo se han quedado solas durante un tiempo suficiente para interferir entre sí. Como es natural, todo el truco de la doble rendija debería realizarse al vacío, porque en caso contrario el átomo rebotaría contra las moléculas del aire y delataría su posición. Esto es lo mismo que decir que el propio aire provocaría la decoherencia. Pero he vuelto a expresarme con cierto descuido. Al decir que «rebota» puede parecer que el átomo ya era una partícula clásica con una posición predeterminada. Ahora sabemos que antes de la decoherencia y de la

medición, solo podemos describir el átomo en términos de su función de onda.

¿Resuelve la decoherencia el problema de la medición?

Algunos dirán que no, que no nos ayuda a resolver la segunda parte, es decir, de qué manera se extrae un resultado de entre una variedad de alternativas (todas ellas posibles resultados) al realizar la medición. La decoherencia nos dice por qué nunca vemos un gato vivo y muerto al mismo tiempo, pero no nos dice cómo se selecciona una opción o la otra. La mecánica cuántica sigue siendo probabilística, y la imposibilidad de predecir las mediciones individuales no desaparece.

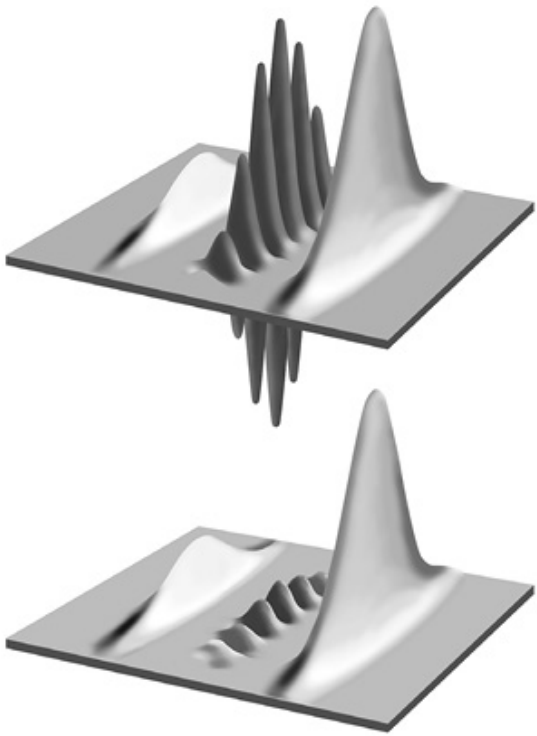
Otros físicos no creen que la decoherencia aporte gran cosa al debate de la medición, ni tan siquiera para el nivel de las superposiciones. Sostienen que lo único que ocurre es que las superposiciones quedan enterradas en la complejidad de la función de onda entrelazada del sistema cuántico y el dispositivo de medir macroscópico, pero en principio siguen estando ahí, solo que somos incapaces de recuperarlas. Y este es el motivo de que nunca veamos esa rareza cuántica en acción.

Los más optimistas en relación con el esclarecimiento del problema de la medición a través de un discernimiento de la decoherencia verán las cosas de otra manera. Esgrimirán que, aunque la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica implica que no podemos afirmar con certeza, ni siquiera en principio, si encontraremos el gato vivo o muerto, ahora se trata de algo equivalente a la probabilidad estadística que nos es tan familiar. No es más que nuestro desconocimiento de qué opción se ha seleccionado, puesto que lo único que tenemos a nuestra disposición es la función de onda. Pero el gato ¡ya está o vivo o muerto!

Por tanto, el acoplamiento inevitable que se produce entre un sistema cuántico y el entorno circundante cuando el sistema ya no se puede considerar aislado, da lugar al entrelazamiento y, por tanto, a la decoherencia. ¿Significa esto que se ha producido una medición? En el caso de que además de producirse la decoherencia se haya seleccionado uno de los resultados permitidos que quedaban, entonces sí, eso es lo que ha ocurrido; se ha producido una medición. No es necesario un observador para colapsar la función de onda y hay un

único resultado esperando a que lo comprobemos cuando queramos.

Yo tengo la impresión de que aún queda mucho por dilucidar. Soy optimista en cuanto a que algún día se esclarecerá incluso el proceso de selección posterior a la decoherencia. Algunos físicos, como Roger Penrose, lo creen posible. Muchos otros, que trabajan en los campos de la cosmología y la gravitación cuántica, creen que el problema ya se ha resuelto.



La forma en que el proceso de decoherencia elimina la rareza cuántica se puede ilustrar mediante una gráfica tridimensional que se conoce como «distribución de Wigner». Los dos ejes horizontales indican la posición y la cantidad de movimiento, así que cada punto de la superficie irregular se corresponde con una posición y una cantidad de movimiento específicas de una partícula cuántica. Los dos abultamientos más amplios indican las dos localizaciones posibles de la partícula si quisiéramos buscarla. Claramente hay el doble de probabilidades de detectarla en la derecha que en la izquierda, puesto que el pico es el doble de alto. Las oscilaciones del centro se corresponden con los términos de interferencia. Estos no son resultados posibles de la medición, sino que son los estados intermedios equivalentes a la opción del gato vivo y muerto al mismo tiempo.

Así que la próxima parada serán las diversas interpretaciones de la mecánica cuántica.

33. Recordemos que Newton ya pensaba que la luz se compone de partículas.

34. Un contador Geiger es un tipo de detector de partículas que emite un sonido cada vez que capta una partícula subatómica. Los contadores Geiger se usan para medir niveles de radiactividad.

35. Sí, sé que podría haber usado la misma dosis reducida con el gato, pero se trataba de describir la idea original de Schrödinger.

36. Debo aclarar para los lectores no británicos que el Leeds United es el mejor club de fútbol de Inglaterra, desde mi punto de vista, por supuesto.

6. El gran debate

Formalismo frente a interpretación

La interpretación de muchos de los conceptos cuánticos, como la función de onda y sus extrañas propiedades, así como los postulados que nos dicen cómo extraer de ellos información sobre el mundo subatómico, son esenciales para el éxito y la comprensión de la teoría. Y sin embargo, ya hemos visto en la primera mitad de este libro lo difícil que es traducir lo que en esencia son matemáticas avanzadas en palabras con sentido, tanto para los físicos como para los no físicos. Otra manera de decir esto mismo es que, aunque no hay ninguna duda sobre el formalismo de la mecánica cuántica, nadie ha encontrado aún una explicación, o interpretación, satisfactoria de la teoría que convenza a todo el mundo.

Para el experimento de la doble rendija, podemos predecir con gran precisión la forma del patrón de interferencia observado en la pantalla (aunque no podamos predecir dónde caerá un átomo individual). Algo mucho más impactante es que la mecánica cuántica predice con mucha precisión las propiedades de átomos y moléculas y sus partículas constitutivas, así como la naturaleza de las fuerzas que los mantienen unidos para crear la riqueza y diversidad de estructuras que vemos a nuestro alrededor. Este poder predictivo es señal de una teoría científica exitosa. Lo sorprendente es que podamos hacer todo eso sin saber por qué llegamos a los resultados que obtenemos. Parece que nos las apañamos bastante bien sin tener una idea clara en la cabeza de cómo pasa el átomo a través de las dos rendijas.

La mayoría de los físicos que trabajan con ella han aprendido a usar la teoría sin entender por qué funciona. De hecho, algunos de los científicos más eminentes de nuestros días, han admitido abiertamente que ¡nadie entiende de verdad la mecánica cuántica! ¿No debería ser esto un motivo de preocupación? En este capítulo indagaremos en las distintas posturas y puntos de vista que han mantenido, y aún mantienen, los físicos, en relación con el asunto de la interpretación.

Estoy seguro de que voy a incomodar a muchos físicos con lo que diré en este capítulo, ya que pretendo adoptar una actitud agnóstica

ante las distintas concepciones que existen. Al fin y al cabo, mi objetivo en este libro consiste en explicar qué es la mecánica cuántica y por qué es tan extraña. Pero sería extremadamente deshonesto y arrogante por mi parte que fingiera que todo es de color de rosa en el jardín cuántico. Muchos físicos, algunos de ellos compañeros cercanos e investigadores con los que colaboro, están convencidos de que no hay ningún problema. Ellos dirían que es innecesario y carece de todo sentido prestar atención a los conflictos entre distintas interpretaciones de algo que, después de todo, es una teoría matemática eficaz, bien entendida y con coherencia lógica.

Pero sería igual de deshonesto y probablemente este libro sería una lectura menos interesante si no levantara la voz a veces para dejar claro mi punto de vista personal.

Permítame comenzar con una afirmación rotunda pero rigurosa: ninguna interpretación del formalismo cuántico se ha demostrado mejor que el resto basándose en algo más que criterios estéticos o gustos personales. Y esto ha llevado a muchos a pensar que discutir los méritos y las deficiencias de las distintas interpretaciones es un ejercicio fútil. Y, lo que es aún peor, muchos creen que ninguna interpretación es la verdadera, y que todas son formas igualmente válidas de reflexionar sobre lo que sucede.

Esta idea aparece plasmada en la interpretación «calcula y calla», ampliamente citada y que propone que, como se ha demostrado (al menos hasta el momento presente) que es imposible dar con la interpretación correcta, es una pérdida de tiempo hablar sobre ello. Dejemos que los filósofos se preocupen de esos asuntos mientras los físicos continúan usando el formalismo de la mecánica cuántica para aprender sobre la naturaleza.

Durante más de medio siglo, los físicos más serios de- saprobaron las cuestiones de la interpretación. Esgrimían que la mecánica cuántica es única entre todas las teorías científicas en que, a pesar de tener una capacidad predictiva tremenda, lo único que se puede comentar sobre ella, por definición, son los resultados de las mediciones. Eso es lo único que debería importarnos, en lugar de preocuparnos por reclamar una interpretación única para hacer progresos. Esta postura pragmática, o «instrumentalista», se fundamenta en la filosofía del «positivismo lógico» que adquirió popularidad en Europa en la época en que nació la mecánica cuántica. Desde luego, no pretendo apartarme de la física para adentrarme en la

filosofía, pero esbozaré las líneas básicas de esta concepción: si dos personas tienen opiniones distintas pero no hay manera de resolver sus diferencias con hechos empíricos, entonces sus afirmaciones contrapuestas son irrelevantes y deberían optar más bien por irse a tomar una cerveza.

Y ¿qué opinión tengo yo al respecto? Suscribo lo que denomino el punto de vista «calla mientras calculas», el cual me da entera libertad para considerar los méritos relativos de las distintas interpretaciones de la mecánica cuántica cuando no estoy pensando en símbolos griegos, códigos de programación o garabateando álgebra en la pizarra. Por desgracia, todavía tengo que decidirme por una interpretación después de casi veinte años de cavilaciones. Diría que la mecánica cuántica nos permite comunicarnos con fluidez con la naturaleza siguiendo reglas bien conocidas de gramática matemática, pero que ¡aún no contamos con una traducción única de lo que estamos diciendo!

Al decir esto debo admitir que, como la mayoría del resto de físicos, cargo con el peso del legado de Bohr y lo que se considera la interpretación estándar de la mecánica cuántica. Es la interpretación defendida en los libros de texto y que se enseña a los estudiantes universitarios de física como si fuera la única explicación imaginable de lo que ocurre, aunque esta tendencia ha ido cambiando en los últimos años. Tiene a su favor el hecho de que es la interpretación más simple. Con respecto a la aportación de recetas para efectuar cálculos en mecánica cuántica, es la herramienta definitiva del pragmatismo y se conoce sencillamente como la interpretación de Copenhague. Por desgracia, no dice nada sobre algunos de los grandes misterios cuánticos y más bien se limita a esquivar muchos de los problemas. Sin embargo, esa denominación abarca todo un espectro de perspectivas, aunque con un núcleo común.

Por poner un ejemplo de lo arraigada que está la interpretación de Copenhague en la enseñanza de la disciplina, muchas de las afirmaciones que he hecho con anterioridad en este libro no aparecerían en algunas de las interpretaciones alternativas, e igualmente válidas. Por ejemplo, me he extendido bastante en explicar que la función de onda no es una entidad física real, sino tan solo una serie de números que nos permiten emitir predicciones sobre mediciones. Esto solo encaja en la concepción de Copenhague, y no es una característica compartida por otras con las que usted se

encontrará, donde la función de onda representa algo físicamente real. Pero sorprende aún más que en el truco de la doble rendija no haya tenido que insistir en que el átomo debe pasar «de alguna manera» a través de ambas rendijas a la vez. Resulta que esa afirmación no nos viene impuesta ni por el formalismo cuántico ni por la observación experimental. En la interpretación De Broglie-Bohm, veremos que es perfectamente razonable admitir que el átomo solo pasó por una o por la otra rendija y, a pesar de ello, ¡seguir llegando al patrón de interferencia!

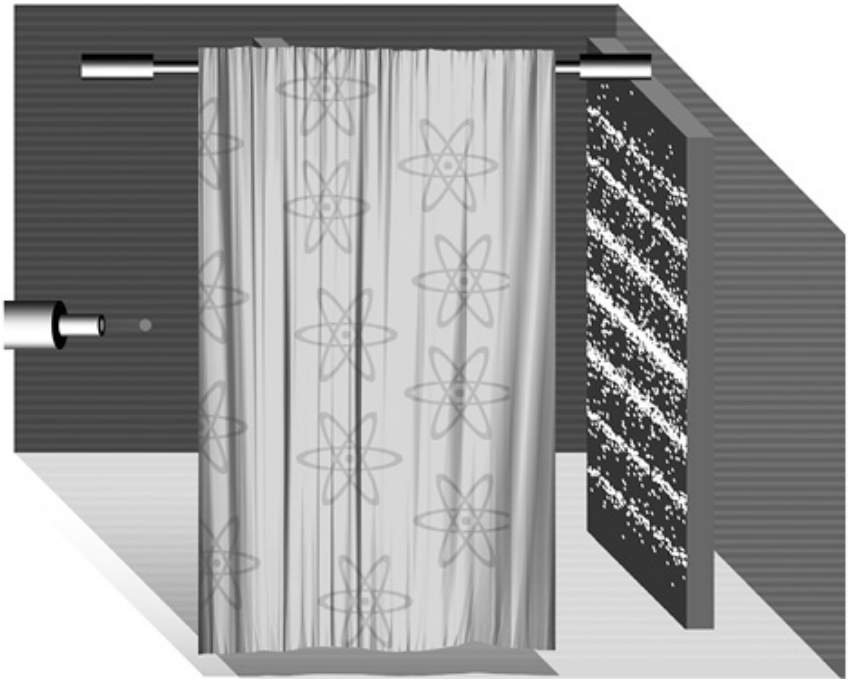
Pero antes analicemos con más detalle aquello en lo que parece que insistieron Bohr y las generaciones de físicos que afirman seguirlo.

La interpretación de Copenhague

La concepción de Copenhague no es tanto una interpretación de una teoría científica como una ideología o una postura filosófica. Ni tampoco todos los físicos están de acuerdo con lo que defiende. De hecho, se ha dicho[37] que

> La interpretación de Copenhague no es un mero conjunto de ideas definidas de manera clara e inequívoca, sino más bien un denominador común para toda una diversidad de puntos de vista relacionados.

Se desarrolló a raíz de los debates mantenidos a mediados y finales de la década de 1920 entre Niels Bohr y el grupo de jóvenes brillantes y geniales que reunió en torno a él en su flamante instituto de Copenhague. El más sobresaliente de ellos fue Werner Heisenberg, con el que ya nos hemos encontrado antes. La principal aportación de Heisenberg a la física consistió en el desarrollo de una formulación de la mecánica cuántica alternativa a la ecuación de onda de Schrödinger que se conoce como mecánica matricial. He evitado comentar este planteamiento porque es muy matemático, pero muchos investigadores dedicados a la física cuántica lo prefieren porque lo consideran una técnica más elegante y eficaz que la formulación de Schrödinger. De hecho, a menudo es necesaria una combinación de ambas.



La explicación de Copenhague: como nunca se puede saber qué sucede tras la cortina cuántica sin que afecte a los resultados, plantear esta cuestión es una pérdida de tiempo y solo cabe hablar sobre lo que *podemos* ver.

Pero hubo otros que también contribuyeron a desarrollar el enfoque de Copenhague, como Max Born, que fue el primero en proponer la interpretación probabilística de la función de onda. Con posterioridad, otros físicos eminentes, como el estadounidense John Wheeler, ampliarían y aclararían muchas de las ideas de Bohr. Pero, en su conjunto, la interpretación de Copenhague debe atribuirse al propio Bohr.

Es curioso que las ideas de Bohr sigan gozando de tan alta consideración aún hoy, tres cuartos de siglo después de que se formularan por primera vez. El físico Roland Omnès (uno de los que desarrolló la idea de la decoherencia) lo resume mejor con las siguientes palabras[38]:

> Por lo común, las teorías físicas se presentan de una manera lo bastante precisa y coherente como para no sentir la necesidad de mencionar a sus fundadores; uno se esfuerza más bien por conservar su espíritu e inspiración. Sin embargo, en contra de esta sana costumbre, los libros más completos dedicados a la interpretación de Copenhague son todos reimpresiones de artículos originales o comentarios eruditos que se convierten cada vez más en comentarios de comentarios a medida que transcurre el tiempo. Dedican gran espacio a un debate interminable sobre las dificultades de la interpretación, que a menudo incluye razonamientos donde la filosofía de la ciencia cobra mayor importancia

que la propia física.

Como es natural, esto no debería restar ningún valor a la genialidad y el discernimiento de Bohr, pero la claridad de sus ideas en sus propios textos dejaba mucho que desear, y eso dio lugar a una diversidad de interpretaciones de su interpretación... ya sabe a qué me refiero.

Sin embargo, hay cierta cantidad de ideas cruciales que son comunes a las numerosas (y a veces contradictorias) versiones de la interpretación de Copenhague.

¿Necesita toda teoría una interpretación?

La aceptación de la coexistencia de más de una interpretación para una teoría científica, siempre que no hagan predicciones distintas, probablemente constituya un rasgo único de la mecánica cuántica. Podemos encontrar un paralelismo interesante al comparar esta situación con la de otros grandes logros de la física del siglo XX.

En 1905, tan solo unos pocos meses después de publicar su artículo sobre el fenómeno fotoeléctrico que le valió el premio Nobel, Einstein concluyó el trabajo que le dio más celebridad: la teoría especial de la relatividad. De acuerdo con ella, distintos observadores que se mueven en relación con los demás discreparán en cuanto a los intervalos de distancia y de tiempo entre dos sucesos. Pero como no puede decirse que ninguno de ellos se encuentre en un marco de referencia privilegiado, desaparece la noción de las longitudes y los tiempos absolutos. Esto solo podía entenderse mediante la unificación de los conceptos de espacio y tiempo. Por tanto, dos observadores que se mueven con una velocidad elevada uno en relación con el otro, discreparán en cuando a la longitud de un objeto. Esto se compensa en cierto modo por el hecho de que tampoco coincidirá el tiempo transcurrido entre dos sucesos que midan sus relojes.

La distancia entre dos puntos y el ritmo al que funcionan los relojes medidos por distintos observadores mantienen una relación entre sí mediante una serie de fórmulas algebraicas que reciben el nombre de «ecuaciones de la transformación de Lorentz» en honor al neerlandés Hendrik Lorentz, quien las escribió por primera vez un año antes de que Einstein publicara su trabajo. De hecho, gran parte del trabajo esencial para la teoría de la relatividad ya se había desarrollado antes de Einstein, y una variante preliminar de esas ecuaciones había sido propuesta de forma independiente por Lorentz y el físico irlandés George Fitzgerald en la década de 1890 para explicar un famoso experimento que desveló que la luz es capaz de viajar por el espacio vacío.

El problema fue que Lorentz y Fitzgerald disponían de la ecuación correcta, pero obtuvieron una conclusión incorrecta. Interpretaron mal lo que sucedía al suponer que el aparato que medía la velocidad de la luz alargaba su longitud debido a su desplazamiento por un «éter» misterioso que impregna todo el espacio. El gran logro de Einstein consistió en proponer un postulado sencillo con el que fue capaz de brindar la interpretación física correcta. Demostró que se puede prescindir de la idea de que la luz necesita de alguna clase de medio por el que propagarse (del mismo modo que una ola necesita el agua). Todo encajó en su lugar cuando lanzó la atrevida propuesta de que un rayo de luz no solo puede viajar a través del espacio vacío, sino que además lo hará con la misma velocidad con independencia de lo deprisa que nos movamos con respecto a él.

Esta concepción difícil de creer pero crucial, y las ideas que le sucedieron, donde el espacio y el tiempo aparecen unificados, nos permiten entender por qué obtenemos los resultados experimentales observados. De este modo, el resultado de Lorentz-Fitzgerald sobre la contracción de la longitud resultó ser correcto, en el sentido de que los números que calcularon concordaban con la observación, aunque no por la razón que ellos habían

propuesto. Fue Einstein quien dio la interpretación correcta. Vemos claramente que el valor de una interpretación atinada de una teoría científica nos acerca más a la realidad. Sin una interpretación válida seguiríamos moviéndonos a tientas en la oscuridad, por mucho que la teoría encajara con la experimentación.

En mecánica cuántica, nadie ha sido capaz de ofrecer una interpretación unívoca y completamente satisfactoria. Pero ¿significa eso que no exista tal interpretación «correcta»?

Ante todo, y sobre todo, esta concepción establece que nunca se puede describir un sistema cuántico con independencia de un aparato de medida. No tiene sentido preguntarse por el estado del sistema a falta de un instrumento de medida, ya que solo podemos averiguar algo sobre el sistema si lo ponemos en conjunción con el aparato utilizado para observarlo.

En segundo lugar, el papel del observador es determinante. Como tenemos la libertad de elegir qué medición efectuar (si medir la posición o la cantidad de movimiento de una partícula, la dirección en la que está polarizado un fotón o en la que gira un electrón), no se puede decir que la entidad cuántica tenga siquiera esas propiedades bien definidas hasta el momento en que miramos. Tiene que permanecer suspendida en una superposición hasta que decidamos qué queremos medir. De este modo, ciertas propiedades del sistema cuántico solo están dotadas de realidad en el instante de la medición. Antes de eso, ni siquiera se puede decir que existan en un sentido definido clásico. ¡Solo los resultados de las mediciones son reales!

Otro postulado de la interpretación de Copenhague es que tiene que haber una demarcación clara entre el sistema (cuántico) que se mide y el instrumento macroscópico de medida (descrito por las leyes de la mecánica newtoniana, o clásica). Así, aunque este último también consiste en última instancia en átomos, no debe tratarse como si estuviera sujeto a las mismas reglas cuánticas. El acto de medir provoca que el estado del sistema medido pase de repente de una combinación de propiedades potenciales a un solo resultado real. El concepto del «colapso de la función de onda» como consecuencia de la medición fue acuñado por primera vez por Heinsenberg en 1929.

No es de extrañar que una teoría tan poco intuitiva como la mecánica cuántica requiera medidas desesperadas para dotarla de algún sentido. Tal vez sea esto lo único que se puede decir sobre el asunto. Así que señalaré mis objeciones a la concepción de Copenhague para justificar por qué creo, junto con muchos otros físicos, que ha perdido su vigencia.

No creo que la interpretación de Copenhague sea una verdadera interpretación. Es un conjunto de reglas que debemos cumplir para

usar el formalismo cuántico sin necesidad de preocuparnos por su significado. Así que la interpretación de Copenhague no solo no explica cómo pasa el átomo por ambas rendijas, sino que además afirma categóricamente que plantearse esa cuestión carece de sentido y que nuestros comentarios deberían limitarse al patrón de interferencia que aparece en la pantalla (la medición). La interpretación de Copenhague logra desterrar contradicciones lógicas e incoherencias al permitir plantear tan solo aquellas cuestiones relacionadas con los resultados de las mediciones.

Muchos de los fundadores de la interpretación de Copenhague, como Bohr, Heisenberg, y Wolfgang Pauli, manifestaron cierto desprecio por una serie de intentos posteriores para elaborar una representación física del mundo cuántico. Lo consideraron una tentativa fútil para regresar a una manera de pensar anticuada (newtoniana) que había sido reemplazada para siempre. De hecho, en épocas más tardías de su vida, Bohr hasta se negó a considerar interpretaciones alternativas con la supuesta esperanza de que simplemente se desvanecieran. De igual modo, Heisenberg se mostró despectivo con esos proyectos porque

> solo se limitan a repetir la interpretación de Copenhague en un lenguaje distinto, [y] desde un punto de vista estrictamente positivista hasta podría decirse que no nos hallamos aquí ante contrapropuestas a la interpretación de Copenhague, sino ante su repetición exacta en un lenguaje diferente[39].

Heisenberg consideraba que el formalismo de la mecánica cuántica determinaba una interpretación unívoca, y que las formulaciones alternativas diferían tan solo en la manera en que interpretaban las matemáticas, más que implicar una física distinta. Huelga decir que discrepo, puesto que para respaldar esta opinión primero hay que estar de acuerdo ¡con la escuela positivista de Copenhague!

Mi segunda crítica es que la interpretación de Copenhague no dice nada acerca de cómo se produce el proceso del colapso de la función de onda. Existe una extraña división en el tiempo (antes y después de las mediciones) en la medida del sistema cuántico. Antes de que miremos, evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. Esta evolución (la forma en que cambia la función de onda con el tiempo), no implica ninguna incertidumbre ni probabilidad. Pero en cuanto se efectúa la medición, hay que atenerse a una serie distinta de reglas que introducen las probabilidades cuánticas. Esta distinción entre un

proceso físico común y una medición es algo que la concepción de Copenhague no puede, ni tan siquiera intenta, explicar.

Por último, y esto es lo más importante de todo desde un punto de vista personal, al atribuir tanta importancia al observador, la interpretación de Copenhague niega la existencia de una realidad objetiva que existe aunque no haya ninguna observación.

Los defensores de esta corriente acusan a quienes todavía buscan interpretaciones del formalismo cuántico de perderse en la metafísica, en lugar de la física auténtica. Pero si es verdad que existe una interpretación «correcta» de la mecánica cuántica, entonces buscarla equivale a intentar explicar cómo se comporta la naturaleza en realidad. Y contentarse con una serie de reglas creadas *ad hoc* a las que atenerse para realizar cálculos solo puede ser una medida provisional.

Pues bien ¿y qué más hay en el mercado? Y si otras interpretaciones nos brindan una explicación más racional y convincente, ¿por qué la interpretación de Copenhague sigue contando con el respaldo de la mayoría de los físicos?

La interpretación De Broglie-Bohm

Varios de los padres fundadores de la mecánica cuántica se mostraron disconformes con lo que consideraban el dogma imperante de Copenhague. Desde bien al principio, Einstein, Schrödinger y De Broglie se esforzaron por formular interpretaciones contrarias de la mecánica cuántica, pero no podían competir con el talento, el empuje y el poder de persuasión del grupo de Copenhague. Está bien documentado que Bohr y Einstein mantuvieron numerosos debates profesionales sobre el sentido de todo ello, y se admite que fue Bohr quien ganó al fin. Pero la razón de que así fuera estribaba en que Einstein siempre insistía en hallar una manera de desterrar toda la rareza cuántica. Ahora sabemos que no es posible, ¡pero eso no significa que Bohr estuviera en lo cierto!

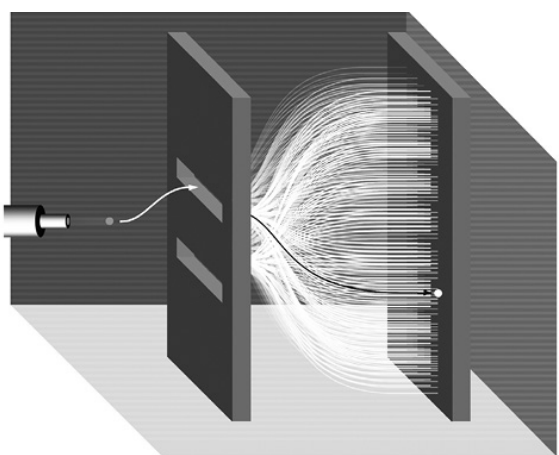
En realidad fue Louis de Broglie quien propuso la primera alternativa seria a la formulación de Copenhague. Él la llamó su «principio de la solución doble» e implicaba una síntesis de los aspectos corpusculares y ondulatorios de la materia que él había planteado. La conferencia Solvay celebrada en Bruselas en 1927

representa uno de los grandes acontecimientos en el desarrollo de la mecánica cuántica. De aquel encuentro se ha dicho que nunca se ha aclarado tanto por parte de tan pocos en un espacio tan corto de tiempo. A ella asistieron los máximos exponentes de la física teórica del momento, incluidos Einstein y Bohr.

De Broglie presentó un artículo en el que planteó la hipótesis de que la función de onda podría representar en realidad una onda física real que guiara las partículas cuánticas reales por determinadas rutas. No había tenido tiempo de aclarar todas esas ideas en su cabeza, de modo que no estaba en condiciones de defenderlas ante las duras críticas de algunos de los asistentes a la conferencia. De hecho, como solo habían transcurrido dos años desde que Heisenberg publicara su mecánica matricial, el círculo de Copenhague se oponía por completo a cualquier formulación que intentara recuperar el «realismo», al considerarlo demasiado gráfico y bastante equivocado en el terreno cuántico.

Un cuarto de siglo más tarde se demostró que habían adoptado una actitud demasiado precipitada, dogmática incluso.

David Bohm, un físico estadounidense afincado en Inglaterra después de verse obligado a dejar su trabajo en Princeton durante la era McCarthy por supuestas actuaciones contrarias a Estados Unidos, consiguió algo que muchos habían creído imposible. En 1952 publicó dos artículos que eran, en esencia, una ampliación de la idea original de De Broglie. Con su trabajo demostró que la interpretación de Copenhague no era la única compatible con todos los resultados experimentales.



Explicación de De Broglie: el átomo se mantiene en todo momento como una partícula

localizada clásica y, como tal, siempre pasa a través de una de las rendijas. Sin embargo, el influjo del potencial cuántico se difunde por ambas rendijas y conduce al átomo hacia una ruta concreta, aunque incontrolable e impredecible, encauzada por el patrón de la distribución cuántica.

Es importante señalar que la interpretación de Bohm no exige añadir nada a las ecuaciones de la mecánica cuántica. Lo que incomodaba a la gente no era la teoría (la estructura matemática a partir de la cual se calculan las propiedades físicas de los sistemas cuánticos), sino su significado. Por tanto, antes de ahondar un poco más en la idea de Bohm, debo volver a hacer hincapié en que estas dos interpretaciones (la de Copenhague y la de De Broglie-Bohm, ya que De Broglie no parece haber recibido el crédito que merecía) no realizan ninguna predicción medible diferente sobre el mundo subatómico. No pueden hacerlo si emplean la misma teoría. Lo que sí ofrecen son dos visiones distintas de lo que sucede en el truco de la doble rendija. Por tanto, difieren en cuanto a la física subyacente y no solo en el lenguaje empleado para describir el formalismo.

Bohm planteaba que la función de onda no era tan solo una entidad matemática, sino una presencia física real. Seguía la vieja idea de De Broglie de rehacer la ecuación de Schrödinger de manera que generara la imagen de partículas definidas guiadas por alguna suerte de campo de fuerza.

Los defensores del planteamiento De Broglie-Bohm señalan que lo que nos devuelve esta formulación es nada menos que la propia realidad. De nuevo podemos plantearnos qué ocurre en realidad cuando el átomo se ve ante las dos rendijas. Puede que no nos guste lo que encontramos, y algunos físicos lo usan como excusa para atacar esta interpretación, puesto que la rareza cuántica (así como la naturaleza no local de la función de onda que nos encontramos antes) ya no está enterrada en cómodas matemáticas, sino que la tenemos «delante de las narices». Bohm permite plantear cuestiones sobre el comportamiento de la naturaleza cuando no estamos mirando. A muchos físicos esto les parece un ejercicio carente de sentido, puesto que no podemos valorar la verdad de nuestras afirmaciones hasta que miramos, y entonces también nos vemos obligados a elegir la interpretación de Copenhague, ya que es una interpretación minimalista relacionada tan solo con los resultados de las mediciones.

Entonces ¿cómo explica la interpretación De Broglie-Bohm el truco de la doble rendija? Bueno, sostiene que parte de la información

enterrada en la función de onda de Schrödinger describe una forma de energía cuántica, denominada el potencial cuántico, que se propaga por el espacio y guía las partículas cuánticas por determinadas rutas. Así, mientras que el átomo en sí solo atravesará una rendija o la otra, el potencial cuántico en realidad impregna las dos. El patrón que se forma en la pantalla se debe ahora a la forma en que se comporta el potencial cuántico al otro lado de las rendijas. Se puede pensar que la forma del potencial cuántico hace que cada átomo se mueva a lo largo de una ruta definida pero impredecible. La verdadera forma del potencial cuántico solo emerge en el patrón de impactos contra la pantalla del fondo cuando han pasado muchos átomos.

El patrón de interferencia desaparece cuando intentamos espiar a los átomos, puesto que alteramos el potencial cuántico. De igual modo, el cierre de una de las rendijas altera el potencial cuántico en todas partes, lo que provoca un cambio en las posibles trayectorias de los átomos que pasan a través de la otra rendija.

La alteración del potencial cuántico en un lugar ¡lo modifica al instante en el conjunto de todo el espacio! Y aunque este rasgo de no localidad no pueda usarse para enviar señales más rápidas que la luz, debido a la impredecibilidad intrínseca de cómo afectará a cualquier partícula dada que esté guiando, sigue siendo este aspecto de la teoría De Broglie-Bohm el que desagrada a la mayoría de sus detractores.

Lo que no debemos olvidar es que la mecánica cuántica tiene un carácter no local, con independencia de la interpretación que decidamos aplicar. Lo único que sucede es que en la concepción de Copenhague, la deslocalización no es más que otra propiedad matemática de la función de onda y, por tanto, no se considera «real». El precio que hay que pagar por ello es que ciertas propiedades del átomo tampoco son reales (hasta que se miden, por supuesto). El físico John Bell, que fue un firme defensor de las ideas de Bohm, siempre sostuvo que ¡prefería renunciar a la localidad mucho antes que a la realidad en sí!

En la interpretación De Broglie-Bohm ya no es necesario pensar en átomos extendidos cuando atraviesan las dos rendijas; se trata de partículas definidas, localizadas en todo momento. Pero es importante señalar que seguimos pudiendo calcular únicamente probabilidades de encontrar el átomo en un lugar determinado usando la función de onda de la misma manera que antes. Así que, a pesar de recuperar la vieja idea del determinismo para la naturaleza, no es un retorno al

universo como mecanismo de relojería de Newton. Nos resulta esencialmente imposible controlar las condiciones iniciales de cualquier partícula dada de tal modo que podamos predecir su trayectoria específica, puesto que cualquier intento que hagamos provocará un cambio del potencial cuántico. Dicho de otra manera, nunca podemos saber de antemano qué rendija atravesará un átomo dado.

Pero además, aunque esta interpretación da por supuesto que cada partícula sigue una trayectoria real, definida, es imposible demostrarlo.

Entonces ¿por qué no arraigó la interpretación De Broglie-Bohm? Sus defensores aún representan una minoría entre la comunidad física. La crítica habitual es que la interpretación De Broglie-Bohm solo funciona porque se basa en la misma teoría matemática que la interpretación de Copenhague. Todo lo demás es irrelevante desde un punto de vista observacional y se fundamenta únicamente en prejuicios clásicos. Pero ni siquiera al propio Heisenberg se le ocurrió un reproche más sólido que decir que era «metafísica» e «ideológica».

Otros físicos consideran innecesarios los supuestos adicionales sobre la existencia del potencial cuántico, y los incomoda su carácter no local. Por ejemplo, en el experimento EPR que comenté en el Capítulo 4, una de las dos partículas influiría al instante en su alejada compañera a través de su potencial cuántico combinado. Pero Einstein nos ha enseñado que la comunicación más veloz que la luz es imposible. De modo que si el potencial cuántico fuera real, entonces la mecánica cuántica entraría en conflicto con la teoría de la relatividad. Pero, tal como mencioné antes, en la práctica las cosas no son tan malas: aunque hubiera un potencial cuántico, el intercambio de señales más rápido que la luz entre las partículas jamás podría usarse para mandar mensajes, debido a la naturaleza probabilística (es decir, imprevisible) intrínseca de las mediciones cuánticas individuales.

Posiblemente la verdadera razón de que esta versión de la mecánica cuántica no sea la estándar se deba tan solo a la eventualidad histórica. Así lo creía el físico estadounidense Jim Cushing, quien sostenía que si la interpretación de Copenhague seguía considerándose la de referencia era, en realidad, porque llegó en primer lugar y la defendieran personalidades de más peso. Sus detractores en la década de 1920 (Einstein, Schrödinger y De Broglie) no disponían de una crítica unificada contra ella. Así, tal como lo

expresa Cushing[40],

> La interpretación de Copenhague llegó antes a la cumbre, y para la mayoría de los científicos en activo parece no haber ningún motivo para desalojarla de ahí.

El programa de Bohm pertenece en realidad a una clase de interpretaciones denominadas teorías de «variables ocultas», y es la variante más sofisticada de esos planteamientos. Estas variables ocultas representan un nivel más profundo de la realidad física que permanece oculta para nosotros, pero que constituye el origen de la incertidumbre y de la imprecisión cuánticas. En la interpretación De Broglie-Bohm, las variables ocultas son las posiciones definidas de las partículas. Por tanto, difiere de la concepción de Copenhague en que establece que una partícula cuántica tiene una posición y una velocidad definidos antes de efectuar la medición, pero somos incapaces de acceder a esas propiedades. El principio de incertidumbre se convierte así en una mera constatación de nuestra ineludible ignorancia.

El matemático John von Neumann pareció aportar una demostración matemática en 1932 que descartaba la posibilidad de las interpretaciones de variables ocultas, lo que respaldaba la idea de la interpretación de Copenhague de que no se puede afirmar la existencia de ciertas propiedades de un objeto cuántico hasta medirlas. Hubo que esperar muchos años hasta que los físicos descubrieron que la «demostración» de Von Neumann era errónea[41]. Una vez tolerado el carácter no local, ya no había ninguna razón que impidiera una interpretación basada en una realidad objetiva como la de Bohm. Las tentativas para eliminar todas las interpretaciones de variables ocultas se conocen como «demostraciones de imposibilidad». John Bell declaró que «lo que revelan las demostraciones de imposibilidad es una falta de imaginación». Sin embargo, en tiempos más recientes, David Mermin, uno de los físicos que ha contribuido en gran medida a promover las ideas de Bell, devolvió el golpe respondiendo que «lo que revelan las demostraciones de posibilidad es un exceso de imaginación».

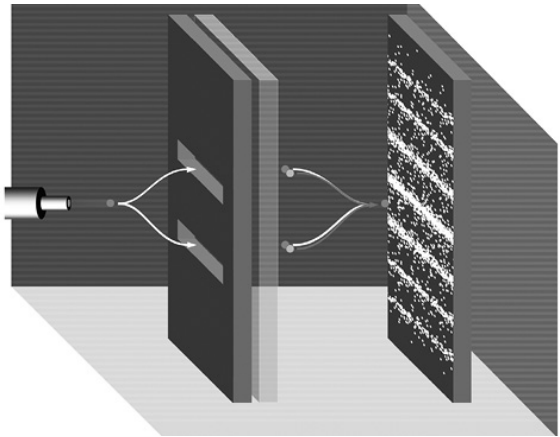
La interpretación de la pluralidad de mundos

Varios años después del trabajo de Bohm, otro estadounidense,

llamado Hugh Everett III, propuso lo que él bautizó como la «interpretación del estado relativo» (que suena bastante inofensivo, ¿no?). Desde entonces, este planteamiento se ha considerado tanto la interpretación más estrafalaria y extravagante de la mecánica cuántica como la más simple de todas, dependiendo del bando en el que nos situemos. De hecho, yo mismo fluctúo entre ambos extremos, de forma que un día me pregunto cómo puede haber alguien tan tonto como para hacerle caso, y al siguiente me planteo cómo puede haber alguien que contemple otra alternativa.

La interpretación de Everett, como la De Broglie-Bohm, está libre del problema de la medida que invade la versión de Copenhague. Y tampoco necesita la deslocalización física de Bohm. Además, si bien la decoherencia encaja con bastante comodidad en las dos primeras interpretaciones, da la impresión (al menos a mí) de que encuentra un alojamiento más natural en la formulación de Everett o en sus variantes actuales. Hasta aquí todo bien. Pero no olvidemos nunca que la rareza cuántica debe manifestarse de un modo u otro. En este caso lo hace mediante el escandaloso requisito de que tenemos que residir en uno entre una cantidad infinita ¡de universos paralelos!

¿Qué podría conducirnos a semejante conclusión? Es como si el único criterio seguro para llegar a una interpretación válida de la mecánica cuántica fuera que tiene que sonar extraño. Tal vez haya otra interpretación por ahí en la que toda la rareza se desvanezca a partir de la noción de que la medición cuántica debería implicar una señalización hacia atrás en el tiempo. ¡Oh, aguarde un momento, esa explicación ya se ha descubierto! Se denomina «interpretación transaccional», y comentaré algo sobre ella hacia el final del capítulo. Pero seguro que ve usted a dónde estoy llegando. Es indudable que estas concepciones diferentes, aunque serias, de la manera en que se comporta la naturaleza a escala microscópica hacen que las teorías seudocientíficas de la *New Age,* como los poderes místicos de los cristales y las pirámides, parezcan palidecer un poco a su lado.



La explicación de la pluralidad de mundos: todas las realidades posibles coexisten. El átomo pasa a través de una rendija distinta en cada universo, y ambos universos se superponen tan solo al nivel del átomo individual. En cada universo, el átomo siente la presencia de su yo paralelo que ha pasado a través de la otra rendija. La superposición, y por tanto interferencia, es el resultado de la superposición de universos.

Pero volvamos a Everett. Su interpretación ha generado desde entonces una serie de variantes. Aunque la idea original se conoce ahora como la interpretación de la pluralidad de mundos, también existe la interpretación del multiverso, la interpretación de la pluralidad de historias y la interpretación de la pluralidad de mentes. Personalmente, me gusta bastante la primera, no entiendo bien la segunda, y no me interesa en absoluto la tercera.

La idea básica es la siguiente: cuando un sistema cuántico se topa con una elección entre varias alternativas, como una partícula que debe pasar por una de entre dos o más rendijas, entonces, en lugar de que la función de onda entre en una superposición, pensamos que ella, y todo el universo con ella, se escinde en una cantidad de realidades igual al número de opciones disponibles. Estos mundos/universos/ramales diferentes serán idénticos entre sí salvo por la opción elegida por la partícula: en un universo habrá pasado por la rendija superior, mientras que en el otro habrá cruzado a través de la inferior. Los universos se superponen, solo en esa región donde está sucediendo la interferencia, hasta que se produce la decoherencia. Entonces, esta los separa en realidades independientes sin interacción entre ellas. Eso es todo. Ya no hay ningún proceso de medición, y la función de onda no necesita «colapsarse». El gato de Schrödinger acabará muerto en un universo, y vivo en otro. Nosotros, como observadores, también nos escindiremos y, por consiguiente, solo veremos el resultado de nuestro

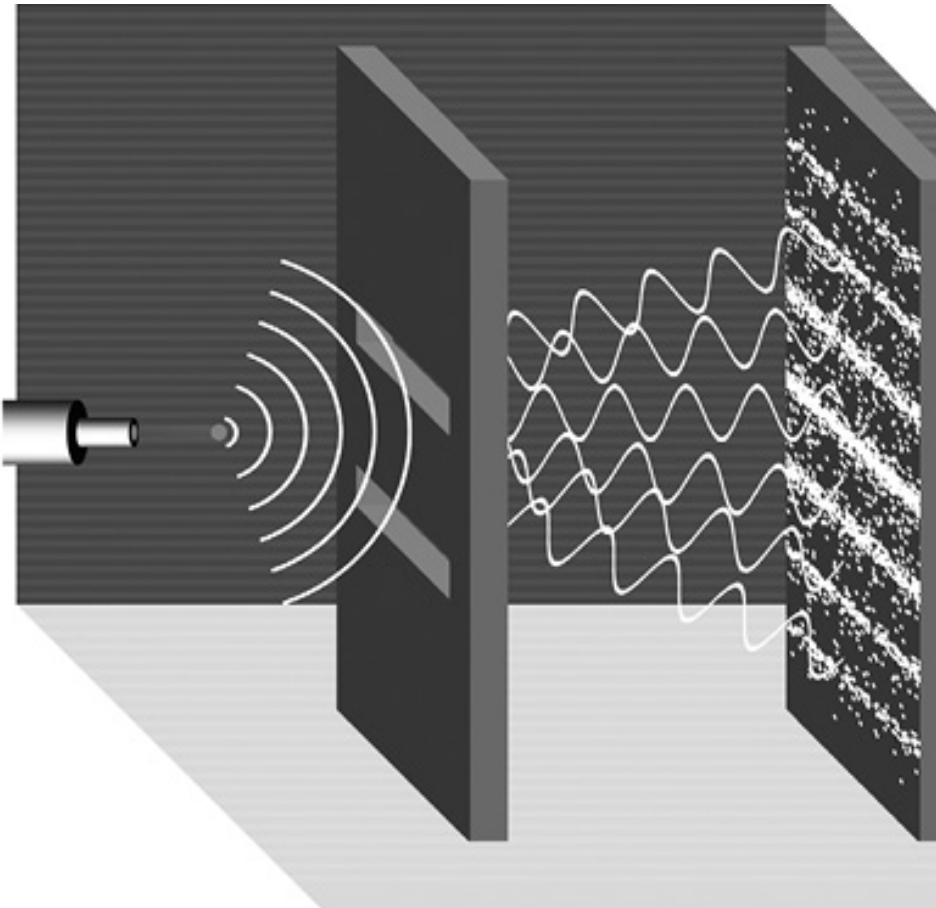
ramal. Pero habrá otras copias de nosotros en universos paralelos para quienes sucederán los resultados alternativos.

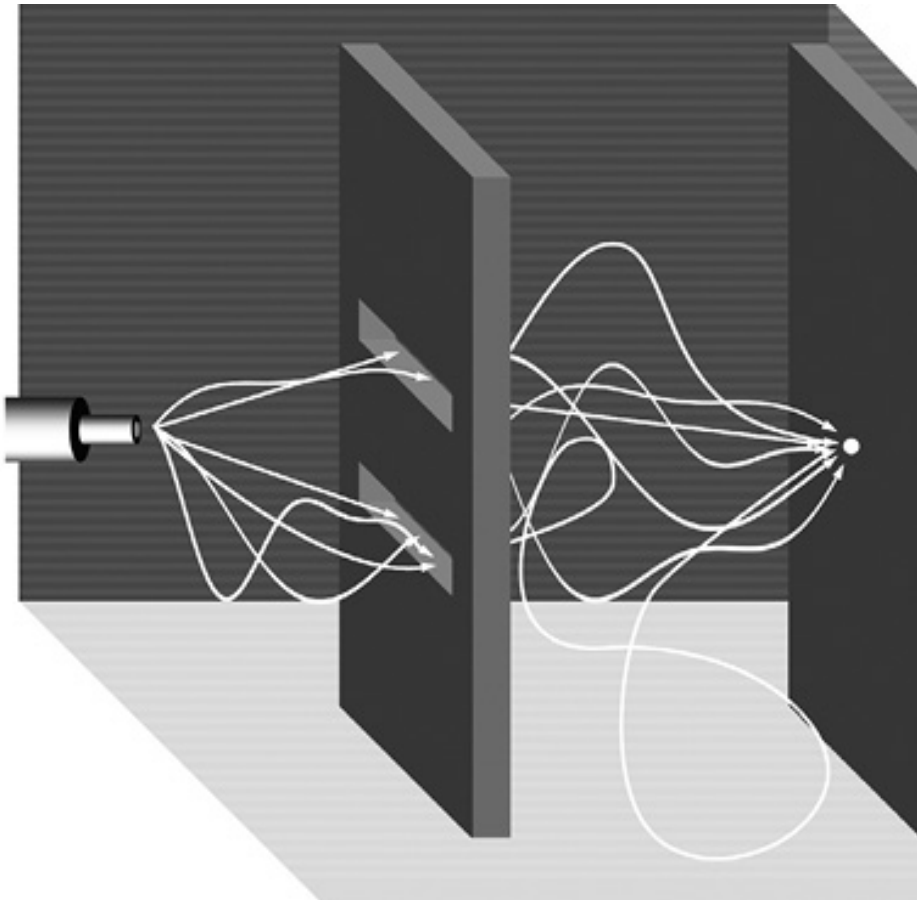
Hugh Everett quedó muy desilusionado y desanimado por la falta de apoyo a sus ideas por parte de otros físicos; de hecho, cuentan que Bohr lo despreció cuando Everett fue a visitarlo a Copenhague. Abandonó la física para trabajar primero como analista de defensa, y después como contratista privado de la industria de defensa estadounidense, donde amasó una fortuna calculando cómo sacar el máximo rendimiento a las tasas de muerte durante una guerra nuclear. Precioso. Bryce DeWitt recuperó el interés por su trabajo a finales de la década de 1960, y fue él quien acuñó el término de la «interpretación de la pluralidad de mundos».

El físico de Oxford David Deutsch, uno de los padres fundadores del campo de la computación cuántica, planteó una variante de la idea de Everett en la que todos los posibles universos ya existen y no tienen que esperar a toparse con alternativas cuánticas para escindirse. Deutsch también ha propuesto una comprobación de esta interpretación que exige el desarrollo de inteligencia artificial. La prueba consistiría en ver si se produce o no el colapso de la función de onda, puesto que en la interpretación de la pluralidad de mundos no lo hace.

¿Qué más hay en el mercado?

Algunas interpretaciones han quedado desacreditadas o descartadas con el paso de los años, bien por ser demasiado improbables o porque fueron excluidas por nuevos resultados experimentales. Por ejemplo, concepciones relacionadas con la formulación De Broglie-Bohm, conocidas como teorías realistas locales, se eliminaron de la lista después de los resultados experimentales de Alain Aspect a comienzos de la década de 1980, que confirmaron la violación de la desigualdad de Bell (de la que hablamos en el Capítulo 4). De manera análoga, es difícil que hoy en día alguien se tome en serio todavía la idea de que la consciencia es un requisito para el colapso de la función de onda.





Arriba: La interpretación transaccional: aunque esta interpretación no contribuye a esclarecer el gran misterio de cómo se las apaña un átomo para pasar por ambas rendijas a la vez, sí intenta explicar cómo sabe el átomo si lo están mirando o no antes de pasar por las rendijas. Al llegar a la pantalla, o en un detector próximo a una de las rendijas, el átomo envía una señal hacia el pasado que comunica a la onda en propagación cómo debe comportarse: si debe pasar por ambas rendijas e interferir, o si debe atravesar solo una de ellas.
Abajo: La explicación de las historias sumadas: el átomo se mantiene como partícula, pero explora todas las rutas posibles de forma simultánea, por muy improbable que sea su trazado. Al sumarlas, todas las rutas se cancelan entre sí dejando tan solo disponible la ruta física que sigue el átomo. Pero la forma en que se cancelan las rutas depende de las opciones disponibles; si están abiertas ambas rendijas, hay más rutas disponibles y la cancelación es distinta.

Una de las primeras propuestas fue la interpretación estadística (interesante por ser la que respaldaba Einstein), que admite que la mecánica cuántica solo se pronuncia sobre conjuntos completos de mediciones (de sistemas cuánticos idénticos), en lugar de hacerlo sobre una medición individual, de ahí la reverencia a la estadística global. Como ahora se pueden realizar experimentos con sistemas

individuales, incluso con átomos individuales, la supervivencia de esta interpretación precisa una aclaración más amplia por parte del pequeño grupo de expertos que la defiende.

Dos incorporaciones nuevas a la lista son la interpretación transaccional y la de las historias coherentes. La primera de ellas, formulada por John Cramer, se parece al planteamiento De Broglie-Bohm en que es explícitamente no local. De hecho, la deslocalización es más acusada incluso en este caso: lo que se necesitan no son conexiones instantáneas por el espacio, ¡sino conexiones a través del tiempo! El acto de abrir la caja de Schrödinger envía una señal al pasado para comunicar al núcleo radiactivo si se tiene que desintegrar o no.

El enfoque de las historias coherentes, debida sobre todo al físico de partículas y premio Nobel Murray Gell-Mann y su colaborador James Hartle, aún no ha arraigado de verdad, pero está reuniendo un grupo creciente de seguidores. Combina las funciones de onda y las probabilidades de un modo coherente que no requiere actos de medición. Fue propuesta por primera vez en 1984 por Robert Griffiths, y desarrollada unos años después por Roland Omnès. Según esta concepción, una «historia» se define como una secuencia de acontecimientos cuánticos en instantes sucesivos. La ventaja de esta propuesta es que permite asignar probabilidades a distintos acontecimientos (como cuándo se desintegrará un átomo radiactivo), incluso aunque se den fuera, en el espacio interestelar, lejos de cualquier instrumento de medida.

También debo mencionar que existen varias interpretaciones basadas en la teoría de la reducción dinámica[42]. Estos planteamientos exigen algo adicional que provoque de vez en cuando el colapso espontáneo de la función de onda por sí sola (sin necesidad de mediciones). Aunque se puede hacer que la teoría concuerde con todas las observaciones conocidas, aún no se sabe qué mecanismo físico real provocaría ese colapso. Experimentos que se realicen en un futuro inmediato deberían permitir comprobar si de verdad ocurre eso. De ser así, habría que modificar la mecánica cuántica. Pero la mayoría de los físicos lo considera altamente improbable.

La realidad cuántica según De Broglie y Bohm

Chris Dewdney, Escuela de Ciencias Medioambientales y de la Tierra, Universidad de Portsmouth

Aunque la interpretación De Broglie-Bohm no sea la más popular entre los físicos, existe cierta cantidad de versiones de ella. La base común de los diferentes enfoques es que las partículas tienen

posiciones bien definidas que evolucionan de acuerdo con ecuaciones deterministas del movimiento. A partir de determinadas supuestas posiciones iniciales de todas las partículas de un sistema (recordemos que estas no se pueden controlar) y la manera en que la función de onda cambia con el tiempo, podemos calcular con exactitud cómo se moverán las partículas. Por tanto, todo el futuro (y el pasado) del sistema se puede predecir, incluidos los resultados de cualquier medición que pudiera estar implicada. A este respecto, no hay más misterio en la mecánica cuántica que en la mecánica clásica. Las distintas formulaciones surgen de lo que se afirma sobre cómo se producen las trayectorias.

En su origen, Bohm presentó la teoría en términos de un nuevo tipo de fuerza surgida de un potencial cuántico que empuja las partículas hacia sus lugares correctos y responde de la diferencia entre el comportamiento cuántico y el clásico. Bohm quería destacar, por contraste, las diferencias esenciales entre los mundos cuántico y clásico. Otros siguen la versión de John Bell y sostienen que lo único que necesitamos es la ecuación que determina las trayectorias (que deben contemplarse como una clase nueva de ley de la naturaleza en sí misma), y que deberíamos huir de todo discurso sobre potenciales cuánticos y fuerzas cuánticas que, por desgracia, constriñen la teoría dentro de una abominable forma newtoniana. Uno de los problemas que tal vez entorpeció la aceptación de la interpretación De Broglie-Bohm en el pasado es que en todos los casos, salvo los más simples y carentes de interés, las trayectorias no se pueden calcular a mano. Pero desde finales de la década de 1970, se han efectuado muchos cálculos explícitos a partir del experimento de la doble rendija que han esclarecido cómo funciona exactamente este enfoque.

Un rasgo interesante de la interpretación De Broglie-Bohm, tal como señaló Bohm en 1952, es que, aunque la teoría básica reproduce todos los resultados esperados, se pueden contemplar variaciones que surgen al relajar algunos de los supuestos de la interpretación y que introducen efectos observables novedosos. En la actualidad, se trabaja para poder determinar en qué circunstancias se conseguiría detectar tales efectos.

Una de las propiedades más fundamentales de la mecánica cuántica que pone bien de relieve la interpretación De Broglie-Bohm es la deslocalización. La deslocalización consiste en el acoplamiento de sistemas separados en circunstancias en que, de acuerdo con la relatividad, no debería ser posible ninguna interacción entre ellos. Según la relatividad, todas las influencias deben propagarse a una velocidad igual a la de la luz o inferior a ella, pero la deslocalización desafía este mandato. Una de las cuestiones más interesantes que plantea la teoría De Broglie-Bohm en la actualidad es cómo encajar su carácter explícitamente no local con las prescripciones de la teoría de la relatividad. Se admite que ninguna medición que se pueda efectuar con sistemas cuánticos puede revelarse en conflicto con la relatividad mediante la manifestación explícita de influencias superlumínicas: no podemos usar la mecánica cuántica para enviar señales con velocidades superiores a la de la luz. También se da por hecho que cualquier interpretación realista de la mecánica cuántica tiene que tener procesos no locales. Bohm señaló que, aunque su interpretación dé lugar a los resultados estadísticos de la teoría cuántica, que se sabe que concuerdan con la relatividad, en el plano fundamental de los procesos individuales (que responden de esos resultados) viola el espíritu de la relatividad. Hay que tolerar las influencias superlumínicas y, es más (afirmaba él), en contra del principio básico de la relatividad, existe un marco de referencia especial, o privilegiado, donde las influencias son instantáneas. Muchos físicos no logran concebir este distanciamiento de la relatividad, ni siquiera considerando procesos ocultos, y lo citan como un motivo de insatisfacción con el enfoque de Bohm. Hasta se han efectuado experimentos para averiguar qué rasgo de un experimento fija el sistema de referencia privilegiado donde las influencias se ejercen de manera instantánea. Pero la concepción de Bohm no representa la única opción.

En tiempos más recientes, se han presentado varias propuestas que revelan cómo podría ampliarse la formulación de Bohm sin necesidad de introducir sistemas de referencia privilegiados, incorporando el carácter no local en una interpretación De Broglie-Bohm completamente relativista. Este trabajo evidencia que se puede superar el mayor escollo, la contradicción entre la interpretación De Broglie-Bohm y la teoría de la relatividad. Por

supuesto, aún queda mucho por hacer, sobre todo en relación con los procesos descritos por la teoría cuántica relativista de campos. Sin embargo, la cuestión es que no existe ningún argumento demoledor que descalifique la interpretación De Broglie-Bohm, y en última instancia todas las objeciones a esta concepción se basan en una preferencia por cierta clase de ideas frente a otras.

¿En qué punto nos encontramos?

En realidad los problemas de interpretación solo llevan las dos últimas décadas dentro del ámbito de la investigación respetable. Esto se ha debido en parte a la nueva generación de experimentos increíblemente sofisticados y novedosos de física atómica y óptica, así como a la impresionante labor que se está realizando en los nuevos campos de la criptografía cuántica y la computación cuántica. En muchas de esas investigaciones, los científicos están manipulando ¡átomos individuales!

Cuando yo era estudiante nunca me alertaron sobre los problemas de la interpretación. Y aunque el tema de este capítulo solo sirva para confundir a estudiantes y distraerlos de efectuar cálculos y mediciones útiles y relevantes, da la impresión de que los debates sobre estas cuestiones se han considerado un tabú hasta tiempos muy recientes. Murray Gell-Mann lo expresó de esta manera:

> Niels Bohr lavó el cerebro a toda una generación de físicos para que creyeran que el problema ya estaba resuelto.

Incluso en palabras del propio Bohr:

> No hay ningún mundo cuántico. Lo único que hay es descripción físico cuántica abstracta. Es un error pensar que el cometido de la física es descubrir cómo es la naturaleza. La física [solo] consiste en lo que nosotros podemos decir sobre la naturaleza.

Discrepo. Al menos en este punto creo que Einstein tenía razón. Einstein creía que la función de las teorías físicas consiste en «acercarse lo máximo posible a la verdad de la realidad física». Así que, con un verdadero espíritu de *Expediente X,* prefiero pensar que «la verdad está ahí fuera». No sé si llegaremos a ella algún día o no, pero estoy seguro de que no será una búsqueda vana. El mero hecho de que el formalismo de la mecánica cuántica nos permita el lujo de contar con varias interpretaciones entre las que (aún) no somos capaces de decidirnos, no implica que no haya una interpretación correcta.

Por supuesto, es posible que no lleguemos a descubrirla nunca,

pero es demasiado arrogante por nuestra parte afirmar que, como nosotros no somos capaces de elegir una, la naturaleza tampoco lo sea.

37. Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley & Sons, Nueva York, 1974), p. 87.

38. Roland Omnès, *The Interpretation of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, 1994), p. 81.

39. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy* (Nueva York, Harper and Row, 1958), p. 129.

40. James T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (University of Chicago Press, 1994).

41. En realidad, Grete Hermann demostró solo tres años más tarde el error de Von Neumann, pero la concepción de Copenhague estaba tan arraigada que su demostración parece haberse silenciado por completo.

42. La más conocida proviene de tres físicos italianos: Ghirardi, Rimini y Weber, quienes la propusieron en 1986, y por eso se conoce como la formulación GRW. Roger Penrose planteó otra que defiende que la gravitación puede desempeñar la función de colapsar la función de onda.

7. El mundo subatómico

Llegados a este punto, tal vez tenga usted la impresión de que los físicos cuánticos se pasan el tiempo debatiendo sobre la naturaleza de la realidad y discutiendo sobre cuestiones tan profundas y relevantes como la definición de los términos«suceso» y «fenómeno», y qué significa medir algo, o ideando maneras cada vez más imaginativas de describir qué acontece o no acontece en el mundo microscópico cuando no estamos mirando. Nada más lejos de la realidad. La mayoría de los físicos no podría prestar menos atención a las cuestiones relacionadas con la interpretación de la mecánica cuántica, y hacen bien. Están demasiado ocupados en usar la teoría para desentrañar la estructura y las propiedades del mundo subatómico.

De hecho, sin esta actitud de «calcula y calla», no habríamos conseguido a lo largo del último medio siglo los inmensos avances en ciencia y tecnología que comentaremos en el Capítulo 9.

Ahora que he agotado el debate sobre cómo podríamos desentrañar el misterio del truco de las dos rendijas, pasemos a considerar cómo contribuyó la mecánica cuántica al nacimiento de nuevos campos de investigación científica en busca de los elementos esenciales que conforman la materia, y cómo esos elementos esenciales interaccionan y se combinan para crear la hermosa complejidad del mundo que nos rodea. A lo largo del último siglo, los físicos accedieron a entidades cada vez más profundas y cada vez más pequeñas, observando en primer lugar las entrañas del átomo, después dentro de su núcleo, y más tarde en el interior de las partículas que conforman el núcleo. La búsqueda de los elementos constitutivos últimos de la materia es comparable a pelar una cebolla. A medida que se retira cada una de sus capas aparece una estructura más fundamental debajo de ellas. Este capítulo consiste, pues, en la historia del desarrollo de la física atómica, nuclear y de partículas, y cómo la mecánica cuántica ha sido la luz de guía durante toda esta odisea de descubrimiento. Por supuesto, es imposible que logre hacer justicia a la historia de estas disciplinas en un solo capítulo, así que nos limitaremos a realizar un recorrido rápido con breves altos en el camino para acercarnos a

algunos de los hitos y personalidades que han tenido más peso en la física del siglo XX.

Pero lo más importante es que todavía hay que completar la lista de la rareza cuántica. Aún tenemos por delante varias perlas, como el efecto túnel, el espín y el principio de exclusión de Pauli.

Rayos misteriosos por todas partes

En el Capítulo 2 describí cómo los años transcurridos entre 1895 y 1897 marcaron el nacimiento de lo que se denomina la física moderna. Visto en retrospectiva desde el momento actual, tal vez sería más adecuado bautizar aquellos primeros años apasionantes como el «periodo de los rayos misteriosos», ya que fueron apareciendo por todas partes. El intervalo previo a la llegada del nuevo siglo conoció el descubrimiento de los rayos X, la radiactividad y el electrón, cada uno de los cuales supuso toda una sorpresa para la comunidad científica[43]. En la década siguiente reportarían el premio Nobel a sus descubridores: Wilhelm Röntgen, Henri Becquerel y Joseph (J. J.) Thomson, respectivamente. Recordemos que en el Capítulo 2 perfilamos el nacimiento y desarrollo de la teoría cuántica siguiendo la idea revolucionaria de Planck en el paso del siglo XIX al XX. Sin embargo, por entonces su obra distaba mucho de ser el campo de investigación más emocionante e interesante de la física. Fue más bien el descubrimiento de los rayos X lo que acaparaba la atención de la comunidad científica. Aquellos eran rayos invisibles capaces de atravesar materia sólida y de crear una imagen sobre película fotográfica situada al otro lado. Esta propiedad asombrosa fue un bombazo instantáneo en el público general de todo el mundo, y muchos vieron de inmediato su extraordinaria utilidad en los campos de la medicina y la industria.

Poco después de este descubrimiento, Henri Becquerel, que también estaba interesado en el origen de los rayos X, estudió un compuesto de uranio que emitía un fulgor fluorescente y daba lugar a resultados similares a los observados por Röntgen en su experimento con rayos X. Becquerel descubrió que la radiación del uranio también atravesaba la materia sólida, como los sobres de papel negro que empleaba para proteger sus películas fotográficas de la luz solar, y que dejaba sus huellas en la película sin revelar. Lo primero que pensó fue

que el uranio también emite rayos X como parte de la fluorescencia debida a la exposición a la luz solar. Pero no tardó en comprobar que lo que fuera aquella emisión no tenía nada que ver ni con la luz solar ni con los rayos X. Dos años después, Marie Curie, que por entonces también estaba trabajando con su esposo en los rayos misteriosos, acuñó el término «radiactividad».

Entretanto, uno de los gigantes de la física experimental, el inglés J. J. Thomson, descubrió la naturaleza de otra clase de rayos. Hacía años que se sabía que una placa de metal con carga eléctrica dentro de un tubo de vacío emitía lo que se conocía como un rayo catódico. Pero nadie sabía de qué estaba hecho. Thomson reveló que consistía en partículas con carga negativa mucho más pequeñas que los átomos.

Con un planteamiento que recuerda a la idea de Planck de la cuantización de la energía, solo que una década antes, el irlandés George Stoney había planteado que la electricidad tal vez no fuera continua, sino que se manifiesta en pequeños paquetes indivisibles que él denominó «electrones». Poco después del descubrimiento de Thomson, Lorentz sugirió que debía de tratarse de los electrones de Stoney. A pesar de sus objeciones iniciales a esa idea, fue Thomson quien recibió el Premio Nobel por el descubrimiento del electrón, la primera partícula elemental. A menudo es así como se acreditan los descubrimientos en la ciencia. Thomson no descubrió los rayos catódicos, ni tan siquiera les dio nombre. Pero recibió el Premio Nobel por el experimento que demostraba qué son. Aquel hallazgo marcó el nacimiento de la física subatómica.

Dentro del átomo

Entonces ¿en qué punto se encontraban las cosas a comienzos del siglo pasado? Thomson había planteado que los electrones eran parte de la estructura interna de los átomos. Pero como tenían carga negativa y los átomos son neutros, aquello implicaba que los átomos también debían contener una carga positiva para cancelar la carga de los electrones. Así que Thomson presentó la primera propuesta de modelo atómico, donde los electrones mantenían una distribución uniforme en el seno de una esfera de «materia» atómica con carga positiva. El tamaño de la esfera se podía calcular de manera fiable a partir de cantidades que se conocían en aquella época. Al mismo tiempo,

Becquerel y los Curie estaban convencidos de que la radiactividad también se emitía desde el interior de determinadas clases de átomos. Así que, mientras aún había físicos y químicos que ni siquiera creían en la existencia de los átomos, otros ya estaban vislumbrando lo que había dentro de ellos.

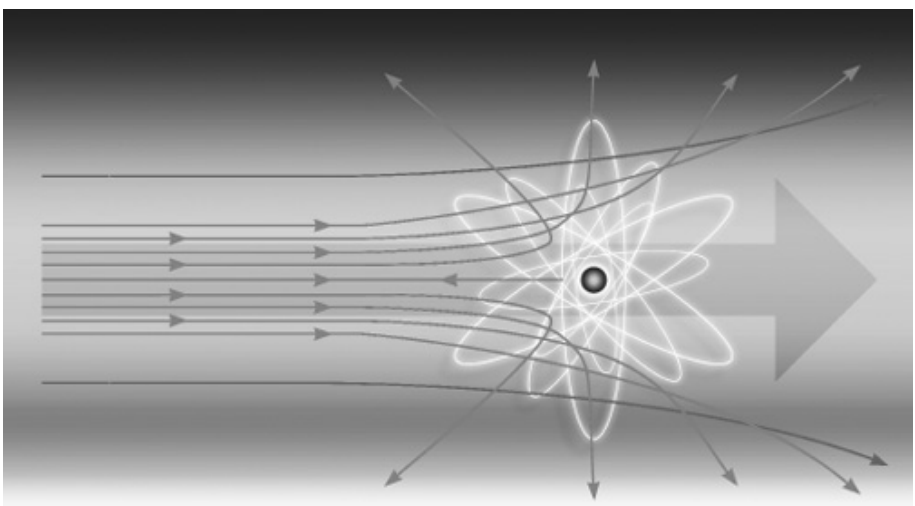
Ernest Rutherford, nacido en Nueva Zelanda, estaba destinado a convertirse en una de las figuras más influyentes de la ciencia del siglo XX. Había acudido a Cambridge para trabajar con Thomson y enseguida quedó fascinado por el novedoso tema de la radiactividad. Descubrió que había tres tipos de radiactividad. Uno, que él llamó rayos beta, resultó ser nada más que los electrones de Thomson. Otra clase, llamada rayos alfa, consistía en partículas mucho más pesadas y de carga positiva que, según demostraría Rutherford más tarde, eran iones de helio (átomos de helio desprovistos de sus electrones). Asimismo demostró que un tercer tipo de radiactividad, con carga eléctrica neutra, descubierto en 1900 por Paul Villard, no era más que otra forma de rayos electromagnéticos, como los rayos X[44], que él llamó «rayos gamma». En la actualidad, como es natural, consideramos los tipos alfa y beta como partículas, no como rayos.

Durante la primera década del siglo, Rutherford fue capaz de revelar que la corteza de la Tierra tenía que tener miles de millones de años de edad, cuando midió la cantidad de helio atrapada en el interior de muestras de roca, donde cantidades minúsculas de mineral de uranio habían estado emitiendo lentamente partículas alfa desde que se formaron las piedras. Cada partícula alfa habría quedado atrapada en la roca y habría adquirido con rapidez un par de electrones para convertirse en un átomo de helio. Esta demostración, sencilla pero irrefutable y planteada hace cien años, de que nuestro planeta tenía que tener más de mil millones de años es algo que los defensores del creacionismo no han sido capaces de rebatir con ninguna credibilidad.

Unos pocos años después, Rutherford se convertiría en el primer científico que logró el sueño alquimista de la transmutación, al realizar un experimento con el que transformó un elemento en otro. No fue ninguna sorpresa, puesto que, junto con Frederick Soddy, ya había identificado la desintegración radiactiva como una forma natural de transmutación.

Con el hallazgo de las partículas alfa, Rutherford no tardó en darse cuenta de que constituían una herramienta para estudiar la estructura

atómica. En 1911, dos de sus colaboradores, Hans Geiger y Ernest Marsden, efectuaron una serie de meticulosos experimentos consistentes en lanzar un rayo de partículas alfa desde una fuente radiactiva contra una lámina de oro muy fina. Las partículas esparcidas se detectaban como destellos diminutos de luz al chocar contra una pantalla fotosensible. A pesar de que la lámina tenía varios miles de átomos de grosor, se comprobó que la mayoría de las partículas alfa la atravesaban en línea recta sin apenas desviarse: claramente los átomos tenían que consistir en su mayoría en espacio vacío. Pero lo que resultó mucho más increíble fue el hecho de que aproximadamente una de cada ocho mil partículas alfa rebotaban de nuevo hacia atrás. Esto es imposible si concebimos los átomos en los términos del modelo de pudin de pasas de Thomson.



De acuerdo con la teoría de Rutherford, cuanto más se aproxima la partícula alfa a una colisión frontal con el minúsculo núcleo atómico, mayor es el ángulo de desviación. Los resultados experimentales de Geiger y Marsden confirmaron de un modo espléndido esta concepción.

Rutherford reparó en la trascendencia de este resultado y propuso un modelo mucho mejor para el aspecto que debía tener un átomo. En primer lugar, sabía que los electrones eran varios miles de veces más ligeros que las partículas alfa, de modo que no serían capaces de desviarlas de su trayectoria. Parecía que las alfa, positivas, se desviaban por la repulsión eléctrica de la carga positiva en el interior del átomo. Lo observado solo se podía explicar si toda la carga positiva se hallaba concentrada en un volumen muy reducido que les

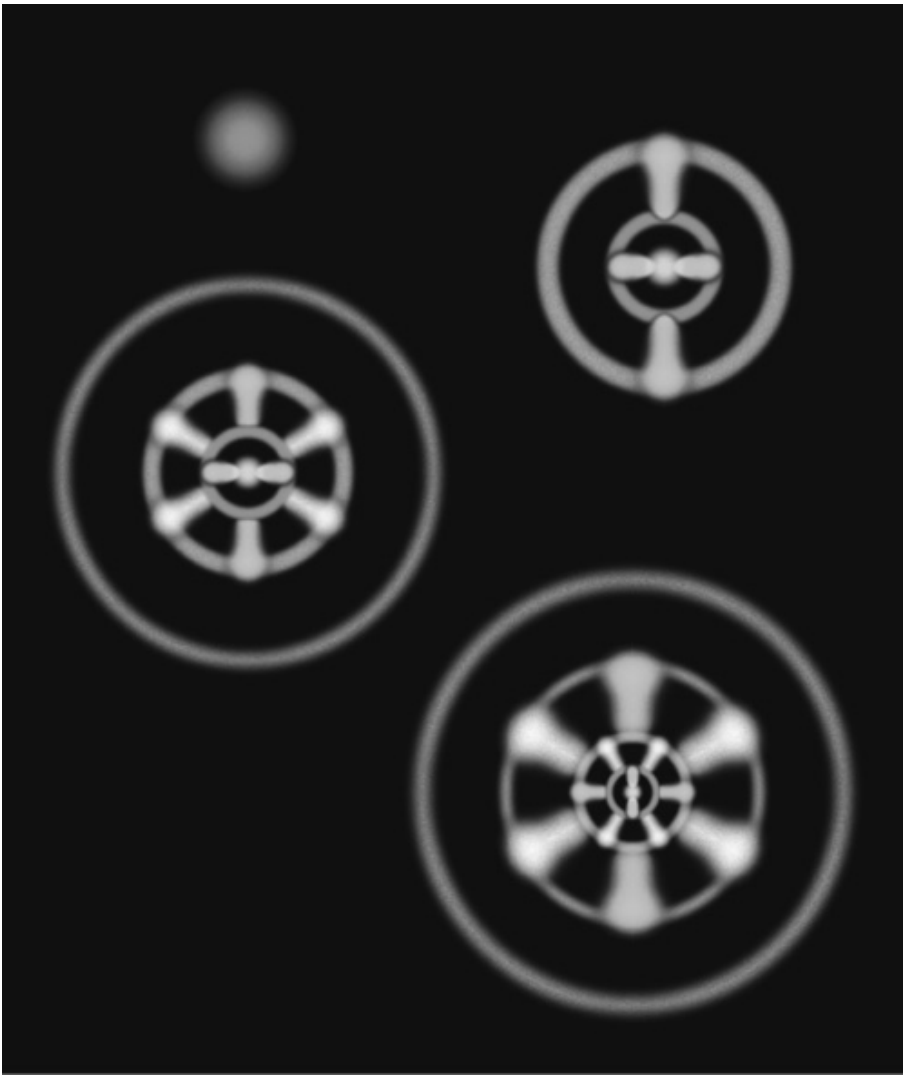
permitiera maximizar su efecto. La mayoría de las alfa lo esquivarían por completo, mientras que algunas pocas se acercarían tanto a él que notarían toda la fuerza de la carga positiva de los átomos de oro, y saldrían repelidas.

Rutherford llamó *núcleo* atómico a esta minúscula concentración de carga positiva, y propuso un nuevo modelo de átomo que consistía casi por completo en espacio vacío con un miníscul núcleo positivo que concentra casi toda la masa del átomo, rodeado por electrones aún más diminutos que orbitan a su alrededor.

Fue entonces, en 1912, cuando el joven Niels Bohr acudió a trabajar con Rutherford y aplicó por primera vez la teoría cuántica de Planck al modelo planetario para explicar su estabilidad, una historia que ya expuse en el Capítulo 2. Pero recordemos que aún faltaba una década para el desarrollo pleno de la mecánica cuántica. En el modelo de Bohr, los electrones aún se consideraban como minúsculas partículas clásicas que zumbaban alrededor del núcleo siguiendo órbitas fijas. Los avances logrados durante la década de 1920 por eminencias de la talla de Heisenberg y Schrödinger evidenciaron que esa representación del átomo no solo era rudimentaria, sino también errónea en muchos aspectos. Ellos demostraron que las reglas cuánticas que, según insistía Bohr, debían obedecer los electrones, se explicaban mejor si se consideraban asociadas a las funciones de onda de los electrones. Resolviendo la ecuación de Schrödinger se podía explicar cómo se disponían los electrones dentro del átomo. Y solo más tarde se vio que las fórmulas *ad hoc* de Bohr emergen de la mecánica cuántica completa. La diferencia introducida ahora era que cada electrón no se podía concebir como una partícula localizada que orbita alrededor del núcleo, sino que debía describirse mediante una función de onda que portaba ciertas etiquetas, denominadas números cuánticos, que definían la energía de ese electrón y su forma de moverse alrededor del átomo. Las funciones de onda de los electrones ocupan todo el volumen del átomo, y nos brindan una distribución de probabilidad que señala dónde sería probable encontrar el electrón si «miráramos ahí». Tal vez se haya topado usted con expresiones como «nube de electrones» o «densidad de probabilidad» de los electrones. Estas aluden simplemente a ese patrón tridimensional de probabilidad que no cambia con el tiempo a menos que el electrón pase de un estado cuántico a otro (lo que es equivalente a la vieja idea de que un electrón «salta» de una órbita fija a otra) si pierde o gana un cuanto de

energía o momento angular[45]. Cualquiera de esos cambios alterará su función de onda y la forma de la distribución de probabilidad asociada.

Por tanto, igual que nos hemos visto obligados a decir que el átomo atraviesa las dos rendijas al mismo tiempo, debemos pensar que cada electrón se encuentra expandido por todo el volumen de su átomo. Esta es la única representación válida del átomo que nos permite la mecánica cuántica. Las distintas regiones del interior del átomo donde cada electrón prefiere pasar su tiempo dependen de la forma de su función de onda, la cual está determinada a su vez por los números cuánticos de ese electrón. Es todo muy matemático y antiintuitivo, por eso resulta mucho más fácil quedarse con el modelo planetario Rutherford/Bohr de los átomos. Tal vez no sea correcto, pero al menos podemos visualizarlo. Sin embargo, el conjunto de la química moderna y gran parte de la física se fundamentan en esta estructura cuántica de los átomos. Los números cuánticos que poseen los electrones definen su distribución en lo que denominamos «órbitas cuánticas» (que son como órbitas difusas, de formas extrañas)[46] o «niveles de energía», los cuales explican de un modo magnífico cómo se clasifican todos los elementos de acuerdo con sus propiedades químicas y cómo se ordenan dentro de la tabla periódica.



Vistas de las nubes de probabilidad del electrón en corte transversal.
Izquierda: El único electrón que conforma un átomo de hidrógeno se encuentra en su estado de mínima energía y es más probable que se halle cerca del centro del átomo.
Centro: Si el electrón del hidrógeno se encuentra excitado en su siguiente nivel energético, su nube cambia de repente. Ahora hay una probabilidad pequeña de localizarlo en el centro, pero es más probable que se halle dentro de una envoltura esférica algo apartada del centro. Entre el centro y la envoltura hay una probabilidad cero de encontrar el electrón.
Derecha: Átomo de carbono formado por seis electrones. Cuatro de ellos no tienen momento angular orbital y poseen unas distribuciones de probabilidad simétricas. Los otros dos tienen una pequeña cantidad de momento angular, lo que significa que la distribución de probabilidad de cada nube se encuentra en cualquiera de tres orientaciones posibles; aquí solo se muestra una.

Pero la mecánica cuántica predice mucho más que la mera configuración electrónica dentro de los átomos. También permite

predecir la transición de electrones entre distintos niveles de energía. Esto se produce, por ejemplo, cuando los átomos interaccionan con la luz. Los electrones pueden absorber fotones siempre que las energías de los fotones se correspondan con los huecos energéticos entre los diferentes niveles. Si esto sucede, el fotón deja de existir, puesto que queda absorbido en su totalidad como energía pura para «excitar» el electrón hasta situarlo en un nivel de energía superior. El electrón no siempre se siente cómodo con esta energía adicional y no tarda en emitir un fotón de la energía justa que le permita descender de nuevo a su nivel energético original. La mecánica cuántica predice la frecuencia y la intensidad de esta luz que reemiten los electrones excitados del átomo.

Cada tipo de átomo posee un esquema único de niveles energéticos permitidos a sus electrones, y los patrones de luz que emiten los átomos cuando sus electrones descienden a niveles energéticos inferiores se denominan «espectros de líneas». Esto es lo que permite saber en astronomía qué elementos existen en las estrellas y galaxias distantes analizando tan solo la naturaleza de la luz observada. Hoy en día la espectroscopia tiene numerosas aplicaciones prácticas.

Dentro del núcleo

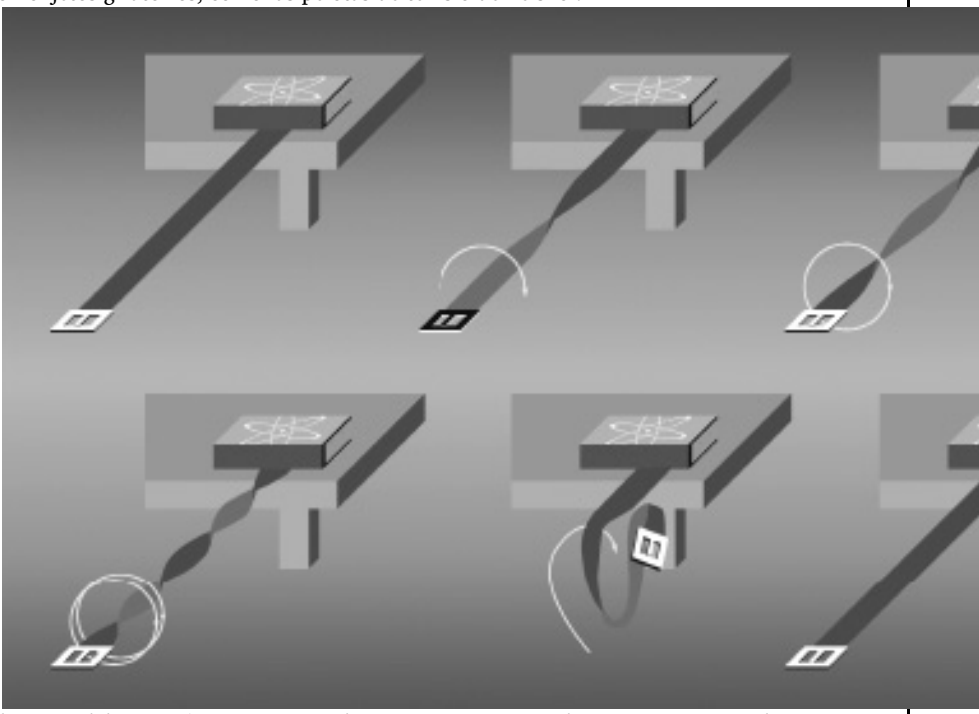
Unos años después de su descubrimiento del núcleo atómico, Rutherford realizó un experimento en el que bombardeó átomos de nitrógeno con partículas alfa. Descubrió que aquel proceso arrancaba núcleos de hidrógeno de los núcleos de nitrógeno que portaban la unidad más pequeña de carga eléctrica positiva, igual y opuesta a la del electrón.

El espín cuántico

Casi todos los libros no técnicos sobre mecánica cuántica eligen explicar el origen de la rareza cuántica mediante el concepto de «espín». Yo he procurado evitarlo hasta ahora a pesar de ser, probablemente, la más cuántica de todas las propiedades cuánticas, porque dista mucho de cualquier cosa que podamos conceptualizar con un lenguaje cotidiano.

En 1896, el neerlandés Pieter Zeeman descubrió que al situar los átomos dentro de un campo magnético y excitarlos, las líneas espectrales (las estrechas bandas luminosas que crean un patrón sobre una pantalla debido a la luz que emiten) se separan en varias componentes. En determinados casos, esta escisión se podía explicar en términos de una teoría clásica (no cuántica) que desarrolló Lorentz, pero en general el efecto no se entendía y acabó conociéndose como el «efecto Zeeman anómalo». Hubo que esperar hasta 1925, cuando Sam Goudsmit y George Uhlenbeck se plantearon que quizá aquel efecto podía guardar relación con una nueva propiedad del electrón que el campo magnético ponía de manifiesto. Usando conceptos basados en la vieja teoría cuántica relacionada con las órbitas de los

electrones de Bohr, propusieron que, aparte de tener un movimiento orbital alrededor del núcleo, el electrón también gira sobre su eje (igual que la Tierra rota sobre sí misma al tiempo que orbita alrededor del Sol). Pero este «espín cuántico» (del inglés *spin,* «giro») no se parece a nada que podamos visualizar basándonos en la experiencia cotidiana que tenemos con objetos giratorios, como las pelotas de tenis o de béisbol.



El truco del cinturón: Si se considera como un truco de magia, este resulta muy poco impresionante, pero sirve muy bien para ejemplificar la naturaleza del espín cuántico. Las partículas de la categoría de los «fermiones», como los electrones, se caracterizan por tener un espín semientero. Esto significa que al rotar un electrón 360° completos, no lo devolvemos a su estado original. Para ello habrá que rotarlo 360° más. Vi el siguiente ejemplo explicado en una conferencia de Roger Penrose*: Fije el extremo de un cinturón debajo de un libro pesado situado al borde de una mesa. La idea consiste en retorcer el cinturón y después eliminar la torcedura haciendo un nudo con el extremo que está libre. Tal vez crea que un giro completo se puede anular mediante un solo nudo. Pero no es así. Sin embargo, si damos al cinturón dos giros de 360 grados, entonces un nudo con el extremo libre anulará la torcedura por completo. No hay que tomarse esta analogía al pie de la letra, pero sirve para ilustrar cómo es posible que un electrón tenga que dar también dos vueltas enteras para completar un «ciclo».

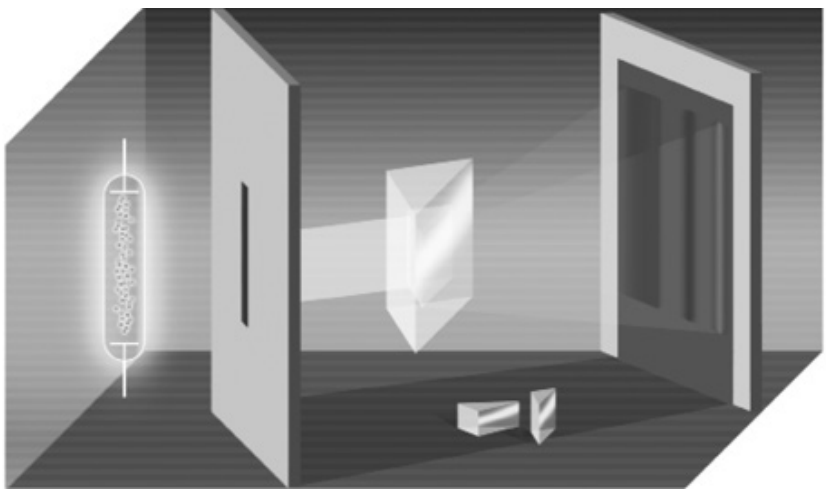
* La idea apareció por primera vez en un libro de texto clásico que se titulaba *Gravitation,* de Misner, Thorne y Wheeler (WH Freeman & Co., 1973).

El problema era que, al igual que el momento angular orbital de los electrones, este momento angular de espín también tenía que estar cuantizado. En primer lugar, todos los electrones giran exactamente al mismo ritmo, y nunca pueden frenarse o acelerarse. Su dirección de giro es aún más misteriosa, porque consiste en una superposición de distintas direcciones a la vez, hasta que miramos. Al hacerlo tenemos que especificar en qué eje (básicamente en qué dirección) están girando, en cuyo caso siempre los encontramos girando o bien en sentido horario, o bien en sentido antihorario, alrededor de ese eje. Sin embargo, antes de que miremos se hallarán en una superposición en la que giran ¡en ambas direcciones a la vez!

Por último, lo que consideramos una rotación de 360° del electrón no lo devolverá a su

estado cuántico original; ¡deberá hacer dos rotaciones completas para lograrlo! La razón de que esto suene raro estriba en que no podemos evitar pensar en un electrón como si fuera una pelota diminuta con un giro debido al movimiento de sus partes internas alrededor de su centro. El espín cuántico es mucho más abstracto que eso y no se puede imaginar en absoluto.

Decimos que todas las partículas elementales que conforman la materia (como electrones, protones y neutrones, y sus cuarks constitutivos) tienen un espín semientero (medido en múltiplos del valor de la constante de Planck) y pertenecen a una clase de partículas que se conocen como «fermiones». Los fotones pertenecen a esa otra clase de partículas llamadas «bosones» y que tienen la propiedad de poseer un espín igual a un número entero de constantes de Planck. Resulta que hay una diferencia fundamental y crucial entre fermiones y bosones, tal como se explica en el recuadro dedicado al principio de exclusión.



Al hacer pasar una corriente eléctrica a través de gas hidrógeno encerrado en un tubo de descarga, el gas se calienta e irradia luz. Esta se descompone entonces en los colores que la conforman mediante un prisma. Pero a diferencia de la luz del Sol, que muestra un espectro suave de arcoíris donde los colores se difuminan unos en otros, ahora vemos una serie de bandas de color bien diferenciadas (llamadas «líneas espectrales»): rojo, azul y muchas en la región del violeta que se acercan cada vez más hasta perderse más allá de la región visible.

Llamó protones a estos núcleos de hidrógeno y rescató una vieja idea de un químico inglés. William Prout había defendido en 1815 que los átomos de todos los elementos son múltiplos del más ligero de todos, el hidrógeno. Rutherford propuso que tal vez aquello no distara mucho de la verdad al fin y al cabo. Quizá fueran más bien los núcleos atómicos los que tuvieran esa propiedad; los núcleos pertenecientes a diferentes elementos no eran más que múltiplos de los núcleos de hidrógeno: protones aislados. Por tanto, los núcleos de helio contendrían dos protones, los de litio, tres, y así sucesivamente a medida que se avanza por la tabla periódica.

Pero la historia no podía acabar ahí. Como los protones portan la misma cantidad de carga eléctrica que los electrones, debía haber

tantos protones en el núcleo como electrones fuera de él (para garantizar que los átomos tuvieran una carga eléctrica neutra). Pero los núcleos parecían ser mucho más pesados que la suma de los protones que contenían. Si no supiera usted la respuesta a este enigma, ¿cuál propondría?

Durante la década de 1920 los científicos plantearon lo que consideraban un truco ingenioso. Tal vez los núcleos estuvieran formados por protones y electrones, bien diferenciados de los electrones en órbita, por supuesto. El número total de protones sería el necesario para reunir la masa adecuada (puesto que los electrones son tan ligeros que podemos olvidarnos de su aporte), pero habría los electrones justos para cancelar la carga positiva del exceso de protones.

Por desgracia esta idea resultó ser errónea. Pero, una vez más, la mecánica cuántica consiguió apuntar en la dirección correcta. El principio de incertidumbre de Heisenberg nos dice que retener un electrón dentro de los minúsculos confines de un núcleo implicaría conocer su posición con una precisión elevada. Esto equivale a que tenga una cantidad de movimiento demasiado errática como para que la fuerza de atracción de los protones lo mantenga ahí durante mucho tiempo. Los electrones sencillamente no podrían estar encerrados dentro de núcleos.

Principio de exclusión de Pauli

Uno de los grandes químicos de todos los tiempos, Dimitri Mendeléiev, siberiano y el más joven de una familia con entre catorce y diecisiete hijos (los registros no están claros), ideó la archiconocida tabla periódica de los elementos a finales de la década de 1860. En ella consiguió agrupar en familias todos los elementos con unas propiedades similares. Sin embargo, el origen de esas agrupaciones fue un misterio durante más de medio siglo, hasta la llegada del prodigio austriaco Wolfgang Pauli con su principio de exclusión.

Pauli explicó que la razón de que los elementos cuenten con distintas propiedades químicas se debe a la manera en que sus electrones ocupan distintas órbitas cuánticas o capas. Cada electrón se describe mediante los números cuánticos asignados a su función de onda. Estos definen los valores de su energía cuantizada, de su momento angular orbital y de su espín. Pauli señaló que en el mismo átomo no hay dos electrones con los mismos números cuánticos. Una vez que se «ocupa» un estado cuántico particular, el resto de electrones se ve obligado a buscar algún otro lugar donde «asentarse».

El principio de exclusión también explica por qué los electrones no se pueden apiñar dentro del núcleo y, por tanto, cómo existe la materia en la forma en que lo hace.

De este modo se explica un problema que había detectado Bohr. Es evidente que si todos los electrones de un átomo descendieran hasta la energía más baja, entonces todos los elementos tendrían idénticas propiedades químicas. Las propiedades de un elemento no están regidas por el número total de electrones que hay en sus átomos, sino por cómo se disponen los más exteriores. Los electrones llenan sucesivas «envolturas», de manera que cada envoltura contiene una cantidad de electrones de acuerdo con ciertas reglas relacionadas con los números cuánticos. Cuando una envoltura está completa, el siguiente electrón tiene que

ocupar el siguiente nivel de energía. Así, son los electrones más exteriores (los «de valencia») los que indican cómo se unen los átomos para crear la variedad aparentemente infinita de compuestos químicos que hay en la naturaleza, y además explican muchas de sus propiedades físicas, como por qué ciertos materiales conducen el calor y la electricidad mejor que otros.

Las partículas que reciben el nombre colectivo de fermiones, como electrones, protones y neutrones, obedecen al principio de exclusión de Pauli. La otra clase de partículas, los bosones, no lo hacen. Los fotones, por ejemplo, no tienen ningún problema para ocupar el mismo estado cuántico, y de hecho lo prefieren así. Una analogía habitual consiste en comparar el comportamiento ordenado de los fermiones con el público asistente a un concierto de música clásica, sentado en filas regulares, mientras que los bosones se asemejan más bien a la multitud que acude a oír un concierto de música pop, donde toda la gente se concentra lo más cerca posible del escenario.

El principio de incertidumbre no manifiesta ningún favoritismo hacia los protones al concederles el honor de residir dentro de los núcleos atómicos. Solo que el hecho de que cuenten con una masa mucho mayor significa que se mueven más despacio que los electrones con la misma cantidad de movimiento, y de este modo, las variaciones en su cantidad de movimiento no dan lugar a fluctuaciones lo bastante grandes[47].

El problema se resolvió cuando James Chadwick descubrió en 1932 una partícula completamente nueva que recibió el nombre de neutrón. Tenía la misma masa aproximada que el protón, pero carecía de carga eléctrica. Heisenberg planteó entonces que los núcleos atómicos probablemente consistían en su totalidad en protones y neutrones, y de pronto todo cobró sentido.

¿Y ahora qué? Era evidente que tenía que haber un nuevo tipo de fuerza de atracción capaz de mantener unidos protones y neutrones dentro del núcleo. Debía ser distinta de cualquier otra clase descubierta hasta entonces en la física. La repulsión eléctrica mutua entre los protones, y la atracción de opuestos entre protones y electrones es una forma de la bien conocida fuerza electromagnética[48]. Esta fuerza, junto con la fuerza gravitatoria, son las responsables tanto directas como indirectas de casi todos los fenómenos naturales. Todos los materiales se mantienen unidos a través de las fuerzas electromagnéticas entre átomos. A una escala mayor, es la fuerza gravitatoria la que mantiene unido el universo.

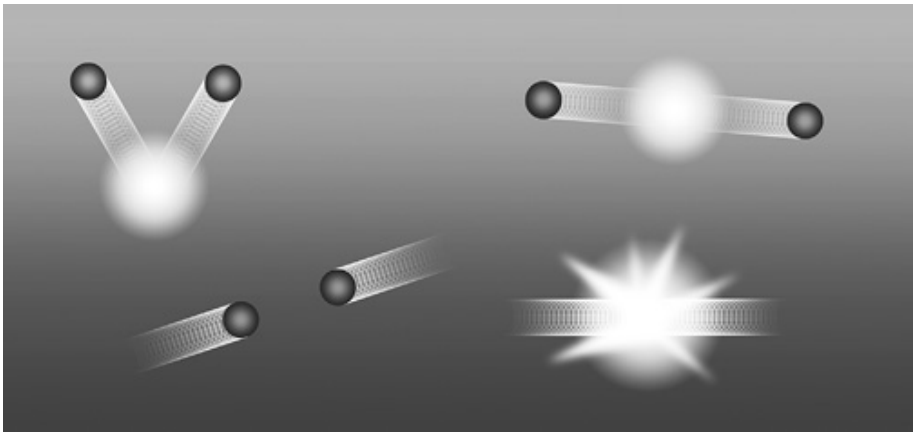
Pero en el interior del núcleo de los átomos nos encontramos con una nueva clase de fuerza. En el año 1935, el físico japonés Hideki Yukawa, presentó una idea para explicar este aglutinante nuclear que le valió el premio Nobel. Para ello se basó en una idea que más tarde se convertiría en uno de los ingredientes cruciales en el campo de la física de partículas: la de una partícula de intercambio. Para explicar

su significado tendré que recurrir a dos conceptos con los que ya estamos familiarizados: el principio de incertidumbre de Heisenberg y la ecuación $E = mc^2$ de Einstein.

Creación de partículas de la nada

Recordemos que el principio de incertidumbre es, en términos más generales, la declaración de nuestra incapacidad para asignar de forma simultánea valores precisos a dos cantidades complementarias, como la posición de una partícula y su cantidad de movimiento. Es algo similar a querer que una moneda caiga de cara y de cruz al mismo tiempo. Hay otros pares de cantidades que entran dentro de esta categoría, como la energía de una partícula y la duración del intervalo de tiempo durante el que posee esa energía. Cuanto más preciso sea nuestro conocimiento de la energía, menos seguridad tendremos sobre su duración. Y de manera análoga, cuanto más breve sea el intervalo temporal contemplado, mayores serán las fluctuaciones energéticas obtenidas. Ahora bien, a diferencia de la conexión entre la posición y la cantidad de movimiento, que planteaban problemas con las funciones de onda y la naturaleza de lo que existe cuando no estamos mirando, aquí nos encontramos con una consecuencia bien definida y perfectamente simple: ¡la creación de partículas a partir de la nada más absoluta!

En el terreno cuántico, la escala temporal a la que ocurren las cosas es muy, muy corta en realidad. Le pondré uno de esos ejemplos sobrecogedores que a los científicos les encanta usar porque implican un rápido cálculo con una cantidad indecente de ceros. La cantidad de veces que un protón puede desplazarse de un extremo al otro de un núcleo atómico en un solo segundo (moviéndose con comodidad dentro del límite de velocidad intranuclear) es muchos miles de veces mayor que el número de segundos transcurridos desde que se produjo la Gran Explosión *(Big Bang)*[49]. Esta escala temporal brevísima permite a partículas como protones y neutrones utilizar el principio de incertidumbre de un modo práctico, pero crucial. Pueden tomar energía prestada de la nada, literalmente, durante un intervalo insignificante porque la energía se devuelve antes de que se viole el principio de incertidumbre. Cuanto menor sea el tiempo del préstamo de energía, más cantidad de ella pueden tomar.



A un nivel cuántico, ni siquiera el espacio vacío lo está realmente, sino que bulle de actividad; por todas partes saltan constantemente a la existencia y la no existencia partículas virtuales. En la creación de pares, una partícula y su equivalente de antimateria se crean a partir de energía pura, por ejemplo, de un fotón. En el proceso inverso, llamado aniquilación de pares, la partícula y antipartícula chocan entre sí y se destruyen mutuamente, lo que las hace desaparecer para siempre con un destello de luz.

Ahora viene la fase II: la ecuación de Einstein nos dice que la masa y la energía son intercambiables, así que la energía que se toma prestada se puede usar para crear una partícula de una determinada masa. Yukawa afirmaba que esa partícula, ahora llamada «pion», se creaba dentro de los núcleos atómicos. Según él, esta partícula era la responsable de la fuerza de atracción que mantiene unidos protones y neutrones, conocidos con el nombre genérico de «nucleones». Los cálculos de Yukawa predecían que cada pion se crea mediante un nucleón, el cual toma energía prestada de su entorno para ello. El pion salta entonces hasta un nucleón cercano, donde vuelve a desvanecerse. Durante su breve existencia, permitida por el principio de incertidumbre, se interpreta como un intercambio entre los dos nucleones que da lugar a una fuerza de atracción que los mantiene unidos. Ese pion suele denominarse partícula virtual, en oposición a real, porque solo puede tener una existencia fugaz.

De manera similar, podemos interpretar la fuerza electromagnética que hay entre partículas con carga eléctrica como el intercambio de un fotón virtual, que se diferencia de uno real en que este conserva su energía todo el tiempo que quiere, mientras no sea absorbido por un átomo, por supuesto.

Las partículas virtuales que se pueden crear a partir de energía pura se conocen como «bosones»; también se denominan «partículas

portadoras de fuerza», en el sentido de que cuando se intercambian entre otras dos partículas, el proceso da lugar a una fuerza entre ellas. Los bosones obedecen reglas cuánticas distintas a las de las partículas de materia propiamente dicha, conocidas por el nombre genérico de «fermiones», como los electrones, protones y neutrones, que son las que forman los átomos y, por tanto, toda la materia que vemos a nuestro alrededor. Pero gracias al trabajo de uno de los físicos teóricos más sobresalientes de todos los tiempos, un inglés tímido llamado Paul Dirac, sabemos que hasta los fermiones se pueden crear de la nada (véase el recuadro sobre antimateria).

Fuerzas nucleares

Es justo afirmar que el estudio de los núcleos atómicos ha sido, y sigue siendo, uno de los temas más desafiantes de la actividad humana. La razón estriba en la compleja naturaleza de las fuerzas que actúan entre los componentes nucleares, los protones y neutrones. De las cuatro fuerzas conocidas de la naturaleza, tres tienen relevancia dentro del núcleo. Ya nos hemos topado con la fuerza electromagnética, que actúa para separar protones (ya que cargas iguales se repelen), y la denominada «fuerza nuclear fuerte», que mantiene unidos todos los nucleones (protones y neutrones). Pero también existe otra fuerza nuclear que se conoce como fuerza débil sin más, y que es responsable de la desintegración beta, la cual retomaremos en unos instantes.

La interacción entre la fuerza electromagnética de repulsión y la fuerza nuclear fuerte de atracción proporciona la estabilidad de los núcleos atómicos. Debido a que la intensidad de estas dos fuerzas varía con la distancia, su efecto combinado conspira para crear una barrera energética en la superficie nuclear llamada «barrera de Coulomb». Esta consiste básicamente en un campo de fuerza que actúa para contener los protones dentro de un volumen determinado[50].

De forma análoga, un partícula con carga positiva procedente del exterior que choca contra el núcleo puede entrar en él si porta la energía suficiente para abrirse camino a través de la barrera de Coulomb. Pero existe otra manera más interesante de que una partícula así supere la barrera, aun cuando no cuente con la energía suficiente. Aquí es donde nos encontramos con otro concepto cuántico que no solo explica la desintegración de la partícula alfa en la

radiactividad, sino que además es el motivo por el que brilla el Sol y de que usted esté aquí hoy.

Antimateria

Junto con Heisenberg, Pauli, y muchos otros, Paul Dirac fue otro de los jóvenes genios que asentó la mecánica cuántica sobre una base matemática firme. De hecho, un sondeo reciente situó a Dirac en el segundo puesto entre los físicos ingleses más eminentes, inmediatamente después de Isaac Newton.

Conviene señalar que Dirac fue uno de los grandes nombres que asistió a la famosa conferencia de Solvay en 1927 sin ningún interés por discutir sobre las distintas interpretaciones de la mecánica cuántica. ¡La belleza estética de las ecuaciones matemáticas le parecía más atractiva que su significado!

En 1927, Dirac esclareció que las dos formulaciones distintas de la teoría, debidas a Heisenberg y Schrödinger, eran equivalentes desde un punto de vista matemático. Después fue el primero en combinar la mecánica cuántica con la teoría especial de la relatividad de Einstein mediante el desarrollo de una ecuación alternativa a la de Schrödinger que describía el comportamiento de los electrones que se mueven con velocidades cercanas a la de la luz. Sin embargo, la ecuación de Dirac contenía una extraña predicción: que también tenía que existir una partícula especular a un electrón, o su antipartícula. Tendría una masa idéntica a la del electrón, pero carga eléctrica opuesta. Esa partícula se llamó «positrón», y se descubrió de manera experimental varios años después. Al positrón también se le ha denominado el «compañero de antimateria del electrón».

Ahora sabemos que todas las partículas elementales poseen su compañera de antimateria asociada. Cuando dos de ellas entran en contacto, se aniquilan por completo entre sí con un estallido de energía, porque se cancelan todas sus propiedades salvo la masa, que se convierte en energía pura. La cantidad de energía creada obedece la ecuación einsteiniana $E = mc^2$.

Este proceso también puede darse a la inversa, de forma que energía pura se convierta en materia: un fotón, que al fin y al cabo es un paquete de energía lumínica, se puede transformar en un electrón y un positrón mediante un proceso que se conoce como «creación de pares».

Pero lo más interesante es que los pares partícula/antipartícula saltan constantemente a la existencia y la no existencia por doquier tomando prestada del entorno la energía que necesitan para su creación, de acuerdo con la relación de incertidumbre energía/tiempo, y existen durante un espacio muy corto de tiempo antes de aniquilarse de nuevo y devolver la energía que tomaron prestada, como si no hubieran existido jamás.

El nuevo concepto se conoce como «efecto túnel» (véase el recuadro de la página 248). Cuando un núcleo emite una partícula alfa, que ahora sabemos que consiste en dos protones y dos neutrones, lo primero que debe hacer para escapar es rebasar la barrera de Coulomb. Pero si aplicáramos al núcleo atómico las ideas de la física newtoniana, a las que estamos tan acostumbrados, nos encontraríamos con que sería imposible que eso pasara. Un grupo de dos protones y dos neutrones unidos entre sí jamás conseguirían suficiente energía entre ellos para escapar del núcleo.

Una manera sencilla de describir cómo se produce la desintegración alfa es en términos de la relación de incertidumbre entre energía y tiempo, tal como se explica en el recuadro. Pero si lo prefiere, y por mantenernos en la línea de los planteamientos de este

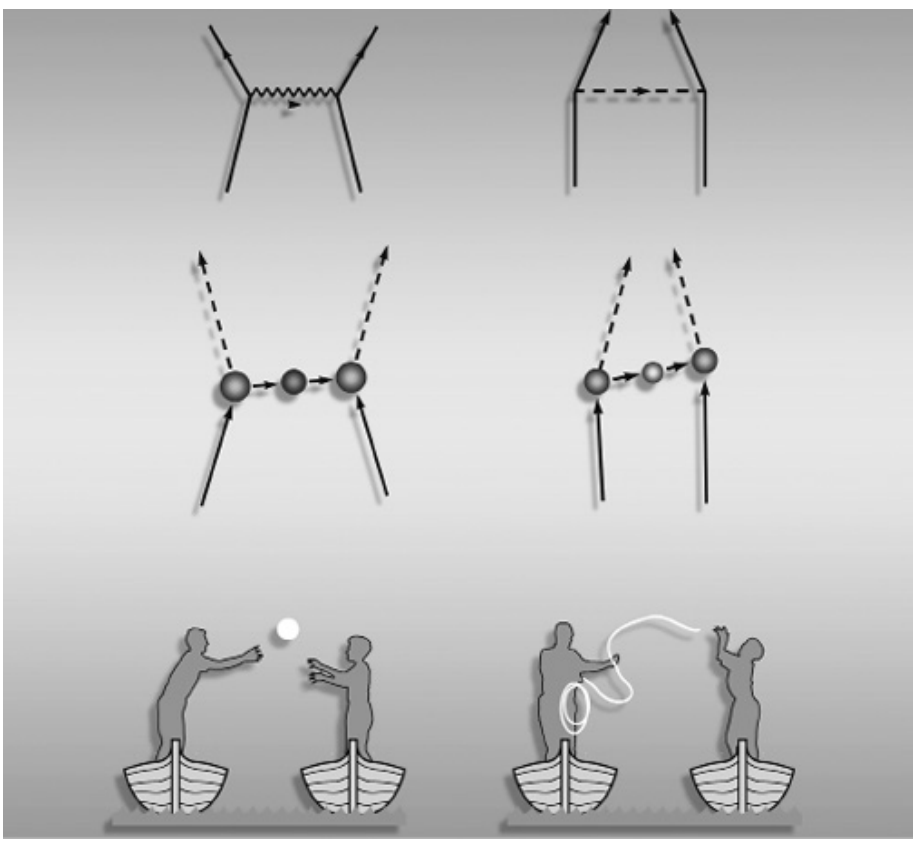
libro, también se puede entender considerando la función de onda de la partícula alfa.

Partamos de un núcleo radiactivo del que sabemos a ciencia cierta que aún no ha emitido ninguna partícula alfa. El paradero de la partícula alfa viene descrito mediante una función de onda que está confinada en el interior del núcleo, con lo que quiero decir que en este momento hay una probabilidad cero de que se encuentre fuera del núcleo. Pero en lugar de imaginar la partícula alfa rebotando aquí y allá dentro del núcleo igual que una pelotita dentro de una caja hasta que adquiere suficiente energía para escapar de ella, decimos que su función de onda empieza a filtrarse fuera del núcleo. Tras un espacio breve de tiempo, hay una probabilidad pequeña de detectar la partícula alfa fuera del núcleo; la mayor parte de la función de onda aún se encuentra en su interior, lo que da una probabilidad más alta de que no haya desintegración. Pero a medida que pase el tiempo, la probabilidad que calculemos para la parte de la función de onda que se haya filtrado fuera del núcleo experimentará un aumento significativo.

Al resolver la ecuación de Schrödinger para obtener la función de onda en distintos momentos, descubrimos que las probabilidades obtenidas concuerdan exactamente con la fórmula de desintegración radiactiva observada. Esta establece que, si partimos de una cantidad elevada de núcleos radiactivos, encontraremos que justo la mitad de ellos se habrá desintegrado después de un intervalo temporal determinado que se conoce como «vida media» (o periodo de desintegración). Tras otra vida media completa, solo quedará la cuarta parte de la muestra original, y así sucesivamente. Pero la naturaleza probabilística de la información que se obtiene a partir de la función de onda explica por qué no se puede predecir jamás en qué instante preciso se desintegrará un núcleo concreto.

A diferencia de la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos protones y neutrones dentro de los núcleos, la fuerza nuclear débil cumple una función muy distinta. Se encarga de causar el segundo tipo de radiactividad, conocido como desintegración beta. Hay dos clases de partículas beta: los electrones y sus equivalentes de antimateria, los positrones. A diferencia de las partículas alfa (que se pueden considerar preexistentes dentro del núcleo, puesto que también están hechas de nucleones), los electrones y positrones tienen que crearse mediante procesos especiales.

Ciertos núcleos no poseen la proporción óptima de protones y neutrones para tener la máxima estabilidad. Para recuperar el equilibrio[51], los neutrones deben convertirse en protones, o al contrario, y durante el proceso se crea un electrón o un positrón para garantizar que se conserve la carga eléctrica. Por tanto, un núcleo con exceso de neutrones experimentará una desintegración beta, durante la cual un neutrón se transformará en un protón más un electrón, el cual se emite desde el núcleo. Un exceso de protones obliga a uno de ellos a convertirse en un neutrón más un positrón, que se lleva la carga del protón.



Las fuerzas que actúan entre partículas (tanto la de atracción como la de repulsión) se pueden considerar arbitradas por el intercambio de una tercera partícula.
El mismo proceso se puede interpretar de distintas maneras:
Arriba: En física las interacciones entre partículas se describen usando «diagramas de Feynman». Las líneas rectas, ondulantes y punteadas denotan las trayectorias seguidas por las diferentes partículas, y la forma en que varía la posición de las partículas con el tiempo se puede seguir recorriendo la página de abajo hacia arriba. Así, el diagrama de la izquierda describe el acercamiento inicial de dos electrones, el intercambio de un fotón entre ellos y la repulsión entre ambos. A la derecha, un protón y un neutrón mantienen la misma distancia de separación hasta que intercambian un pion y se atraen mutuamente.

Centro: Diagrama más esquemático de esos mismos procesos.
Abajo: La fuerza de repulsión entre los electrones se puede comparar con dos personas en sendas barcas que se lanzan una pelota entre ellas. Primero se desplaza hacia atrás la persona que lo lanza, después lo hace la persona que lo recibe. La fuerza de atracción se parecería al lanzamiento de una cuerda entre esas dos personas, de forma que cuando ambas tiran de ella, se acercan entre sí.

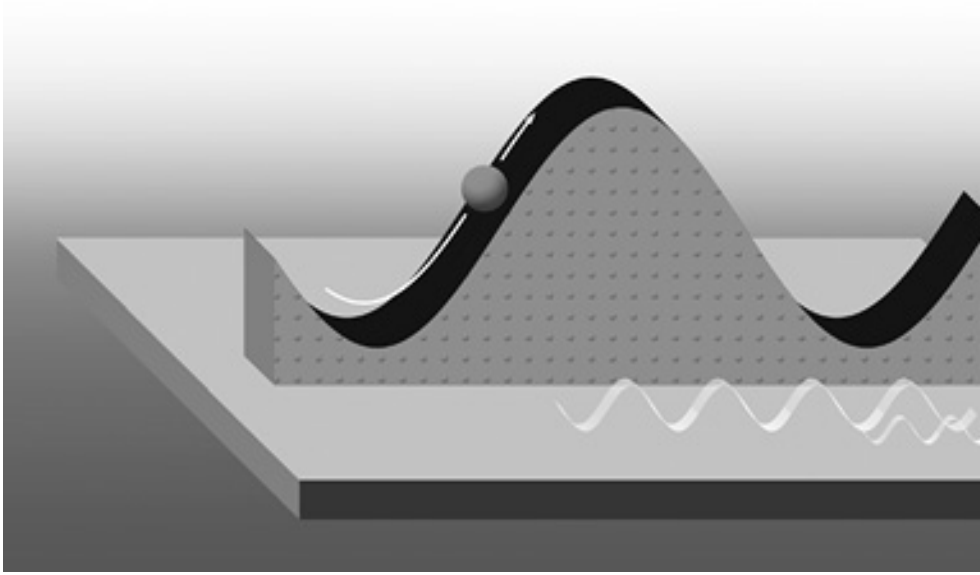
En 1933, Wolfgang Pauli se dio cuenta de que este proceso tenía que conllevar la creación de otra partícula, por entonces todavía sin detectar, que permitiera explicar por qué las partículas beta emitidas no emergían con la energía correcta para equilibrar las cuentas. Esta nueva partícula, tan esquiva, no se confirmó de forma experimental hasta 1956, y recibió el nombre de «neutrino»[52].

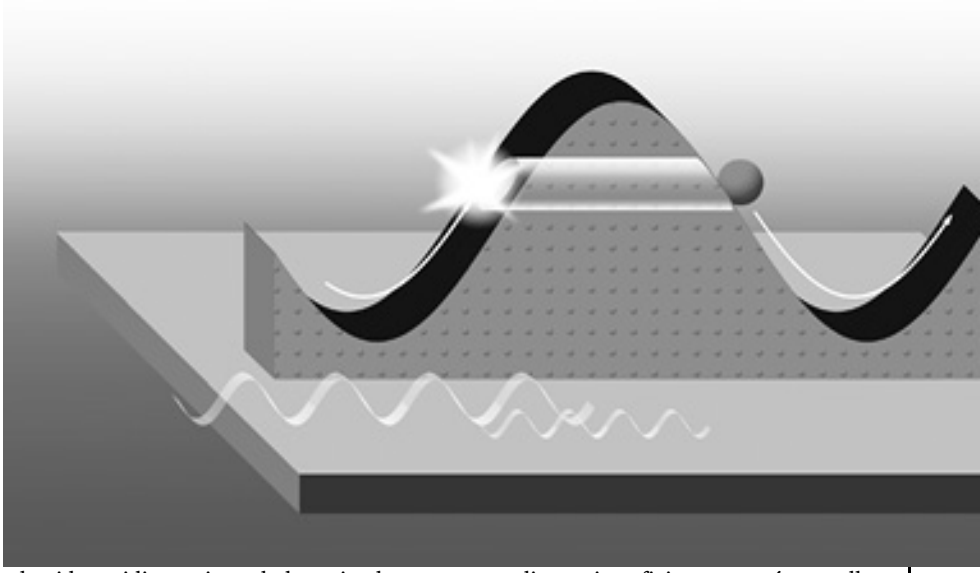
Tanto la desintegración beta como la alfa son maneras en que los núcleos se pueden transformar de una especie en otra. Constituyen, junto con los procesos de fisión y fusión (donde los núcleos se escinden en mitades o se unen, respectivamente), algunos de los procesos que explican cómo se formaron por primera vez los diferentes elementos que vemos a nuestro alrededor en la actualidad, incluidos los que conforman los átomos de nuestro cuerpo. El carbono, oxígeno y nitrógeno, junto con el resto de elementos que constituyen los compuestos químicos necesarios para la vida, se habrían sintetizado en el interior de estrellas miles de millones de años atrás. Esos astros ya no existen, pues explotaron como supernovas; durante el proceso lanzaron al espacio gran parte de su contenido, el cual contribuyó a la formación de nuestro Sistema Solar. De aquí la frecuente y muy cierta afirmación de que estamos hechos «de polvo de estrellas».

El efecto túnel cuántico

El efecto túnel cuántico (o simplemente efecto túnel), también llamado «penetración de barrera», es otro de los fenómenos extraños que solo se dan en el mundo cuántico. Consideremos el siguiente ejemplo. Para que una bola suba rodando por una pendiente y descienda por el otro lado, hay que propinarle la energía necesaria de partida. Mientras sube por la pendiente se va frenando y, a menos que cuente con la fuerza suficiente para llegar arriba, se detendrá y volverá a caer por donde subió. Pero si la bola tuviera un comportamiento mecánico cuántico siempre habría cierta probabilidad de que desapareciera de manera espontánea a un lado de la pendiente y reapareciera al otro lado. Esto sucedería aunque no contara con la energía suficiente para llegar a la cima y sobrepasarla por el camino razonable.

La forma habitual de explicar cómo se produce el efecto túnel consiste en apelar a la relación de incertidumbre de Heisenberg entre energía y tiempo: si la barrera energética que tiene que rebasar una partícula no es demasiado elevada o amplia, podrá tomar prestada suficiente energía del entorno para que se produzca el efecto túnel. Esto será viable siempre que devuelva la energía prestada dentro de un espacio de tiempo que viene determinado por la relación de incertidumbre.





En la vida cotidiana, si una bola asciende por una pendiente sin suficiente energía para llegar a la cima, de manera natural volverá a caer rodando por donde subió. El efecto túnel sería como si la bola de pronto desapareciera en medio del trayecto de subida y reapareciera al otro lado de la pendiente. Aunque nunca presenciaremos esa magia en el macromundo, el proceso ocurre de manera rutinaria en el mundo cuántico. Por supuesto, en este caso, la pendiente es una pendiente energética y se puede concebir como una especie de campo de fuerza que la partícula cuántica no debería ser capaz de vencer.

Pero sería más exacto pensar que la función de onda de la partícula existe como una superposición que la sitúa a ambos lados de la barrera a la vez. Y es la función de onda la que está rebasando la barrera. Solo cuando miramos hacemos que «se colapse la función de onda»

y localizamos la partícula a un lado o al otro.

El efecto túnel cuántico desempeña un papel importante en muchos procesos. A la hora de explicar cómo se produce la radiación alfa, se convirtió en la primera aplicación fructífera de la mecánica cuántica a problemas nucleares. Asimismo sirve de base a numerosos aparatos electrónicos modernos, como el diodo de efecto túnel.

Un ejemplo cotidiano de efecto túnel se produce en el cableado doméstico de aluminio. Sobre la superficie del cableado eléctrico expuesto se acumulará una capa fina de óxido de aluminio, lo que creará una capa aislante entre dos cables enrollados juntos para hacer conexión. De acuerdo con la física clásica, esto debería interrumpir el flujo de la corriente. Pero la capa suele ser lo bastante fina como para que los electrones pasen con facilidad a través de ella por efecto túnel, y se mantenga el flujo de corriente.

Muchos elementos más pesados solo se forman cuando una estrella masiva estalla de forma violenta como supernova. Cuanta más temperatura y más extremas sean las condiciones en el interior de una estrella, más completo llegará a ser el proceso de síntesis y más pesados serán los elementos que se formen. El interior de una estrella solo alcanza la temperatura y la densidad suficientes para crear los elementos más pesados durante esos intensos instantes finales de la vida del astro[53].

Los dos elementos más ligeros de todos, el hidrógeno y el helio, no se crearon en el interior de las estrellas, sino que lo hicieron en el universo primigenio, justo después de la Gran Explosión. Casi el 98% de toda la materia visible del universo actual consiste en estos dos elementos, mientras que el 2% restante lo constituye todo lo demás.

La rica variedad de núcleos que puede existir, de acuerdo con las distintas maneras en que los protones y neutrones pueden combinarse entre sí (y hasta ahora solo hemos estudiado unos pocos cientos de las más o menos siete mil especies posibles)[54], se debe a dos razones. La primera es que los protones y neutrones obedecen a reglas cuánticas similares a las que siguen los electrones en órbita, y que determinan de qué manera se pueden distribuir dentro de los núcleos. Igual que los electrones deben describirse mediante funciones de onda cuyas formas están determinadas por las etiquetas de los números cuánticos que portan, también sería más correcto considerar los nucleones como entidades extensas que se distribuyen dentro del núcleo de acuerdo con sus números cuánticos.

Al menos con los electrones nos podemos permitir el lujo de imaginarlos como minúsculas esferas en órbita, aun cuando no sea correcto. Dentro del núcleo apenas hay espacio, y los nucleones se encuentran apretados, de forma que la única imagen que podemos evocar es la de una bolsa llena de canicas agolpadas en lucha por un sitio.

En la práctica, la imagen que tengamos de un nucleón dependerá de cómo intentemos estudiarlo. Si nos interesa describir cómo interaccionan protones o neutrones de alta energía inmersos en un núcleo con el resto de nucleones, descubrimos que tratarlos como diminutas partículas localizadas permite una precisión razonable. Pero un neutrón externo situado en un núcleo con halo (véase el recuadro de la página 99) tiene una función de onda que se desparrama por un volumen amplio alrededor de todo el núcleo.

La segunda razón de la complejidad de los núcleos radica en la naturaleza de la fuerza nuclear fuerte, que resulta tener un origen aún más fundamental de lo que había anticipado Yukawa con su esquema de intercambio de piones. En la segunda mitad del siglo XX, los físicos empezaron a preguntarse si ocurriría algo aún más profundo en el interior de los nucleones.

Cuarks

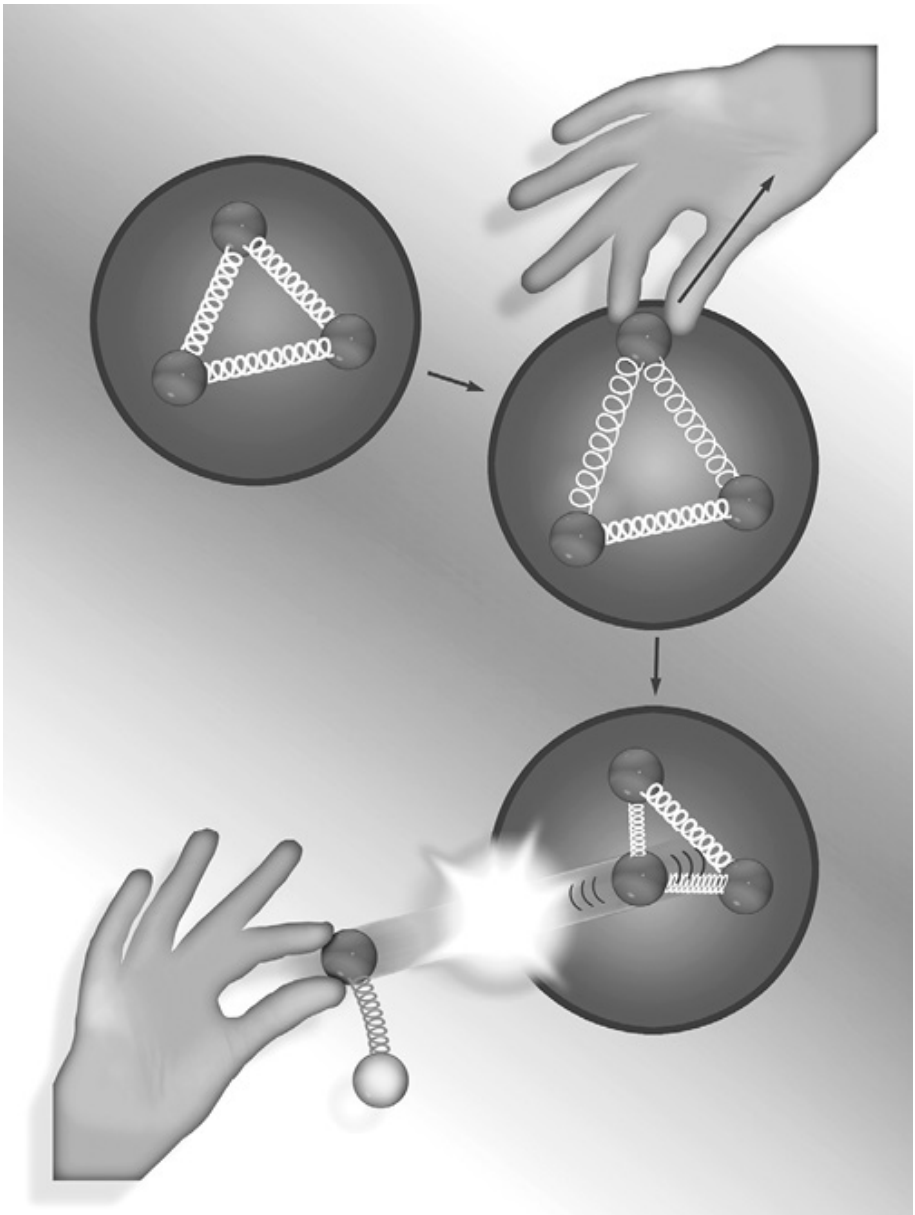
Hacia mediados de la década de 1930 se conocía la existencia de un puñado de partículas elementales. Además de los protones, neutrones y electrones, que conforman los átomos de la materia normal, y de los fotones de la radiación electromagnética, los físicos también habían descubierto los positrones y neutrinos. Luego, poco después de que Yukawa presentara su teoría del pion, se detectó una nueva partícula en los rayos cósmicos que en un primer momento se relacionó erróneamente con el pion de Yukawa. En realidad recordaba a un electrón pesado e inestable, y hoy en día se lo conoce como «muon». Los muones se forman en las capas altas de la atmósfera de la Tierra cuando los protones con mucha energía procedentes del espacio exterior chocan con las moléculas del aire, y solo existen durante una fracción de segundo. Los piones se descubrieron más tarde en experimentos realizados unos años después.

Pronto se construyeron aceleradores de partículas (o trituradores de átomos, como se llamaron al principio) para ahondar más en la estructura del mundo cuántico. La idea era sencilla: en lugar de usar la luz para mirar dentro de estructuras subatómicas, se seguía la estrategia de Rutherford con las partículas alfa. Pero para estudiar escalas de una longitud más reducida había que emplear partículas más energéticas. En esencia, se usaban las propiedades ondulatorias de

partículas materiales, en lugar de ondas de luz. Cuanto mayor fuera la energía del haz de partículas, más corta sería su longitud de onda de De Broglie y menores las escalas de longitud que resolvería. Además, cuanta más energía pudiera liberarse desde un volumen minúsculo, a partir de colisiones cada vez más violentas entre partículas, mayor probabilidad había de que a partir de esa energía se formaran partículas más exóticas.

En la segunda mitad del siglo XX ya se habían detectado tantas partículas elementales nuevas que los físicos empezaron a preguntarse si de verdad serían tan elementales. Igual que habían descubierto que los átomos de las 92 clases distintas de elementos consistían en tan solo tres partículas (protones, neutrones y electrones), también era posible que todas esas partículas estuvieran formadas por unos pocos elementos constitutivos aún más esenciales.

Al clasificar las partículas, se vio que una familia en particular parecía contener demasiadas variedades. Los hadrones son las partículas sensibles a la fuerza nuclear fuerte, y se clasifican en dos grupos. El primero, formado por los llamados bariones, incluye el protón y el neutrón. Pero pronto se les sumó toda una cohorte de nuevas partículas bariónicas, como las lambda, sigma, xi y omega. El segundo grupo, formado por los mesones, contiene el pion junto con cierta cantidad de otras partículas más masivas, como el mesón eta y el caón.

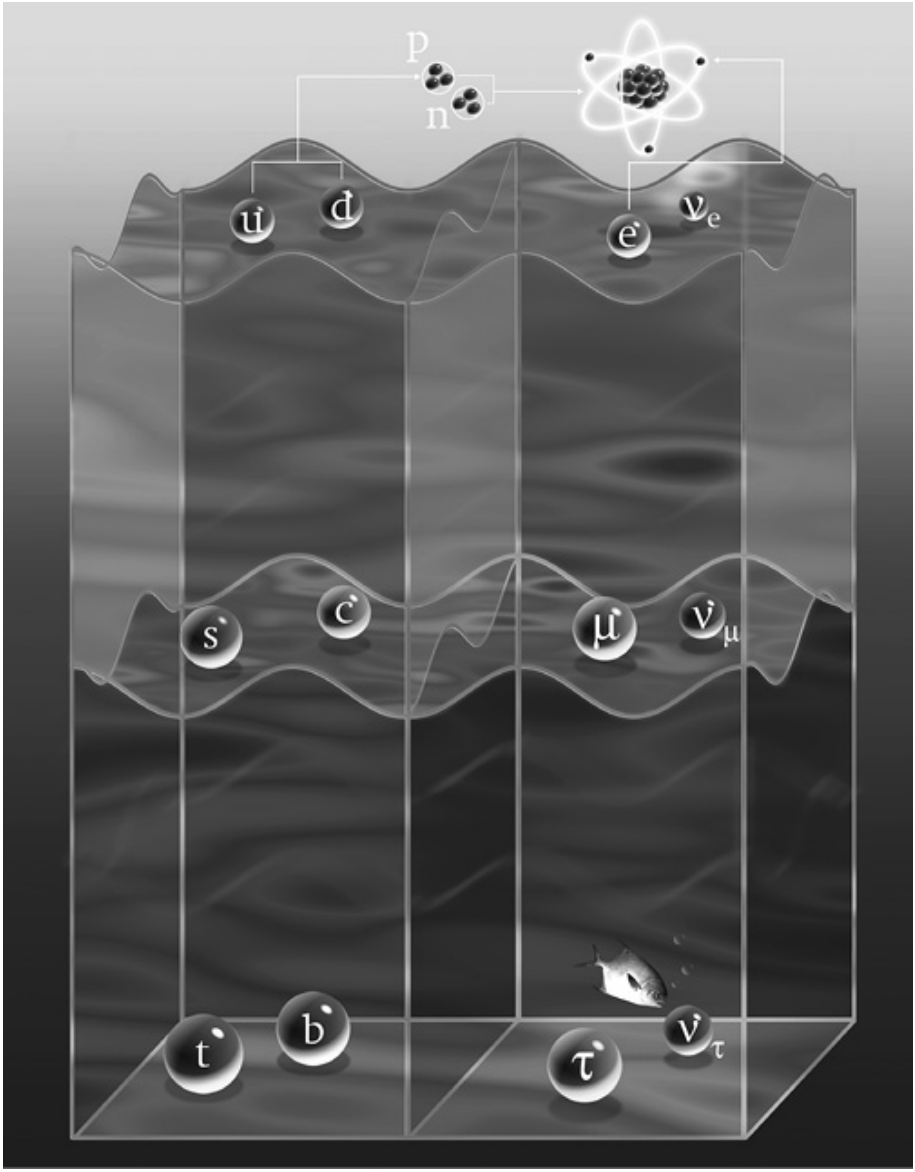


No se puede arrancar cuarks individuales del interior de una partícula como un nucleón. Aunque aportemos la energía necesaria para vencer la unión entre cuarks, lo único que conseguiremos será aportar energía para crear un nuevo par cuark/anticuark mediante el proceso de creación de pares (véase la figura de la página 239). El nuevo cuark reemplazará al arrancado del interior del nucleón, mientras que el anticuark se unirá al cuark arrancado para dar lugar a un mesón.

Con la intención de recuperar la sencillez y la economía, los teóricos Murray Gell-Mann y George Zweig plantearon la posibilidad

de que todos los hadrones (bariones y mesones) tuvieran estructura interna. Demostraron que todas las distintas variedades cobraban sentido si se componían de partículas más elementales llamadas «cuarks».

Pocos años después aquella hipótesis se confirmó en el Acelerador Lineal Stanford de California. Mediante un experimento muy parecido en cuanto a su formulación al famoso dispositivo de esparcimiento de partículas alfa de Rutherford que confirmó la estructura interna de los átomos, se esparcieron electrones de alta energía a partir de protones y neutrones. Esta vez las direcciones en que rebotaban los electrones evidenciaron que dentro de cada nucleón se ocultaban tres paquetes minúsculos de materia. La idea de los cuarks quedaba confirmada.



Los fermiones están comprendidos en tres generaciones de familias de partículas: cuarks en la columna izquierda y leptones en la de la derecha. Toda la materia del universo que se compone de átomos está formada únicamente por la primera generación de partículas (ilustrada en la superficie). Esta familia consiste en los cuarks arriba y abajo, que conforman los nucleones inmersos en los núcleos atómicos, el electrón y su neutrino. La segunda y tercera generaciones de partículas son mucho más pesadas y tienen una vida muy breve. Estas son las que se pueden crear dentro de los aceleradores de partículas.

En un principio se pensó que solo había tres tipos de cuarks (llamados «sabores»). Ahora sabemos que hay seis en total, cada uno de ellos con una masa diferente. Los protones y neutrones se

componen tan solo de dos tipos, de nombres muy poco imaginativos: un protón contiene dos cuarks «arriba» y un cuark «abajo», mientras que un neutrón contiene dos «abajo» y un «arriba».

Resulta que la unidad de carga que porta un protón o un electrón no es el paquete mínimo de electricidad que existe. Tres de los cuarks son negativos y tienen un tercio de la carga del electrón, y los otros tres son positivos y poseen dos tercios de la carga del protón. De este modo, dos cuarks arriba, cada uno con una carga positiva igual a dos tercios de la del electrón, y un cuark abajo con una carga negativa equivalente a un tercio de la del electrón, se combinan para formar la carga del protón, mientras que dos abajo y un arriba se cancelan entre sí en el interior de la partícula de carga neutra que llamamos neutrón.

Los cuatro sabores restantes se conocen, sin motivo alguno, como extraño, encantado, fondo y cima. Pero personalmente prefiero la descripción que dio Terry Pratchett de los cuatro sabores de la magia en sus historias del Mundodisco: ¡arriba, abajo, de lado y menta!

Además de la carga eléctrica, los cuarks también tienen que estar provistos de otra característica que se conoce como carga de color. Esta es necesaria para explicar por qué los cuarks solo se unen en grupos de tres para formar nucleones y todos los demás bariones, pero en pares cuark/anticuark para formar el pion y sus parientes mesones. Hablaré más sobre esto en el Capítulo 8.

En la actualidad se sabe que solo hay dos especies de partículas elementales de materia: los cuarks y los leptones. Estos últimos dan nombre a todas las partículas que no son sensibles a la fuerza nuclear fuerte (o sea, todas las que no portan carga de color), en otras palabras, ¡todas las partículas elementales de materia que no son cuarks! Los leptones incluyen al electrón y sus dos parientes más pesados llamados muon y las partículas tau, así como tres tipos de neutrinos.

Al menos es agradable saber que la primera partícula elemental que se descubrió, más de cien años atrás, sigue siendo elemental. ¡Viva el electrón!

Componentes esenciales

Frank Close, profesor de Física en la Universidad de Oxford

En las distintas etapas de la historia han ido variando los candidatos a elementos constitutivos esenciales. Hace un siglo se creía que los elementos atómicos eran fundamentales; en la década de 1930 fueron los electrones, protones y neutrones. Hoy, el electrón sigue apareciendo en nuestra lista, pero se sabe que los protones y neutrones están formados por partículas aún más pequeñas llamadas cuarks. Una cuestión obvia si nos guiamos por la historia es si el electrón y los cuarks serán de verdad fundamentales, o si estarán formados por piezas aún más pequeñas, a modo de

muñecas rusas. Sinceramente, ¡no lo sabemos! Lo único que podemos afirmar es que con los mejores experimentos que es posible realizar hoy en día no hay ningún indicio de una estructura más profunda. Pero también hay signos de que hay algo especial en esta capa de la «cebolla cósmica».

¿Qué nos conduce a esa conclusión? Existen dos técnicas experimentales; una consiste en el esparcimiento, la otra es la espectroscopia.

Si una supuesta capa fundamental consiste en realidad en componentes más profundos, la mecánica cuántica limita las maneras en que pueden disponerse dichos elementos. Una de esas configuraciones tendrá la cantidad mínima de energía: esto recibe el nombre de «estado fundamental». Uno o más componentes pueden hallarse en un estado superior de energía, lo que hará que el conjunto del sistema tenga una energía mayor. Un componente puede emitir un fotón y perder energía en el proceso; y, a la inversa, la absorción de un fotón de la energía adecuada puede hacer que el sistema ascienda del estado fundamental a un estado de energía más elevado. A partir del espectro de energías de esos fotones, se puede deducir el patrón de niveles de energía del sistema (compuesto).

Los niveles de energía resultantes de una molécula (debido a la vibración de unos átomos respecto a otros), de un átomo (debido a sus electrones), de un núcleo (debido a la vibración y al movimiento orbital de sus protones y electrones) y hasta del propio protón o neutrón (debido al movimiento de los cuarks que los componen) se muestran muy similares desde un punto de vista cualitativo, aunque cuantitativamente difieran.

Las unidades de energía a una escala cuántica son los *electronvoltios:* $1\ \text{eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}$ julios. Para hacernos una idea de la escala, se suelen necesitar varios eV de energía para arrancar un electrón de un átomo. La escala energética para excitaciones moleculares se mide en milielectronvoltios (representado como meV); los núcleos atómicos se excitan a una escala de MeV (millones de electronvoltios), y los protones o neutrones a cientos de MeV. Esto revela que la escala de distancias cada vez más pequeñas implica energías mayores a medida que avanzamos desde moléculas relativamente grandes hasta los compactos protones. Este es el primer indicio de una estructura más profunda. Luego, el esparcimiento directo a partir de esos componentes (como en los experimentos de Rutherford en relación con el núcleo atómico, o el esparcimiento de alta energía de haces de electrones sobre los cuarks) revela sus componentes internos.

Supongamos que hacemos una lista con las variedades de cuarks o el electrón, muon y el tauón (o partícula tau). Los más ligeros tienen masas del orden del MeV. El tauón, cuark encantado y cuark fondo se sitúan en la escala del GeV (miles de millones de eV), mientras que el cuark cima tiene cientos de GeV. ¿Podría ser esto un signo de un espectro nuevo debido a «subcuarks» y «subleptones»?

Sin embargo, seguir la vieja rutina familiar no funciona. No hay ninguna señal de transiciones electromagnéticas (la emisión o absorción de fotones) entre los leptones «pesados» y los «ligeros», por ejemplo, en contra de lo que sucedería si fueran meras excitaciones unos de otros. Lo mismo ocurre con los cuarks, a pesar de que los indicios son menos directos. En segundo lugar, todas estas partículas tienen la misma cantidad de espín (½ unidades de la constante de Planck), y lo esperable sería una variedad de espines si subyaciera toda una espectrocopia de excitaciones. Además, hay signos indirectos de que hay un máximo de tres «generaciones», mientras que un simple espectro de excitación prodigaría toda una diversidad de estados.

Por último, su tamaño (si es que tienen alguno) es inferior a 10-18 m, y con unas dimensiones tan insignificantes, lo esperable sería que todas las masas se situaran en una escala de muchos GeV, en lugar de MeV (como sucede en el caso de los cuarks arriba y abajo, y el electrón).

O estas partículas son realmente fundamentales, o hay en acción dinámicas que trascienden la mecánica cuántica convencional. Y cualquiera de las dos opciones es apasionante. Parece haber algo novedoso en la familia actual de las partículas fundamentales que figuran en el modelo estándar.

Pero ¿hasta qué punto estamos seguros de que los electrones y los

cuarks son los elementos constitutivos más esenciales de la materia? Tal vez con el tiempo descubramos que también ellos poseen una estructura interna. Tal vez haya algo aún más básico y fundamental.

43. Vale, quizá el electrón no fuera del todo una sorpresa.

44. La confirmación de que los rayos X consistían en realidad en radiación electromagnética igual a la luz tuvo que esperar hasta 1912.

45. Recordemos que un «cuanto» significa aquí el paquete o unidad más pequeña de una cantidad que consideramos continua en el macromundo, como la energía.

46. La forma de la órbita de un electrón es, como siempre, algo que podemos calcular a partir de la función de onda, es decir, la nube de probabilidad que muestra la distribución probable del electrón alrededor del átomo.

47. La cantidad de movimiento viene dada por el producto de la masa por la velocidad. Para una cantidad de movimiento dada, si la masa es grande, entonces la velocidad ha de ser pequeña.

48. El magnetismo es otra forma de esta misma fuerza.

49. La Gran Explosión acaeció hace unos 400 000 000 000 000 000 (o 4×10^{17}) segundos, mientras que un protón podría cruzar un núcleo atómico 10 000 000 000 000 000 000 000 (o 10^{22}) veces en un solo segundo, ya que en cruzarlo una sola vez tarda la décima parte de un intervalo temporal llamado zeptosegundo (una milésima de una milmillonésima de una milmillonésima de segundo). Debo señalar aquí que se trata de una palabra excelente y, sin embargo, muy poco utilizada, y que todos deberíamos intentar usarla mucho más en el futuro en expresiones tales como: «vuelvo en un zeptosegundo» o «se acabó en un zeptosegundo».

50. Los neutrones no perciben la fuerza electromagnética porque son neutros y, por tanto, indiferentes a esta barrera energética. Sin embargo, permanecen en su sitio dentro del núcleo gracias a la fuerza nuclear fuerte.

51. Los núcleos de los elementos más ligeros suelen tener la misma cantidad de protones que de neutrones, mientras que los núcleos más pesados tendrán más neutrones que protones.

52. Millones de neutrinos procedentes del espacio exterior atraviesan cada centímetro cuadrado de nuestra piel por segundo y nos atraviesan el cuerpo en línea recta sin «tocarnos». Lo mismo sucede cuando viajan a través de cualquier otro material, así que no es raro que resulten tan difíciles de detectar y de estudiar.

53. Para consultar una descripción interesante y lúcida de cómo se crean los elementos en el cosmos basta con consultar *Nucleus: A Trip Into the Heart of Matter,* de Ray Mackintosh *et al.* (Canopus Publi- shing, 2011).

54. Pensemos que hay alrededor de cien elementos (que se diferencian en cuanto a su número de protones), la mayoría de ellos con decenas de isótopos distintos (que se diferencian en cuanto a su número de neutrones).

8. En busca de la teoría definitiva

Para entender la estructura de nuestro universo en su nivel más profundo, los físicos intentan responder todos los interrogantes y resolver todos los misterios. Nunca dejamos de preguntar «¿por qué?»:

¿Por qué sucedió esto?
Debido a tal y tal efecto.
¿Qué causó ese efecto?
La interacción de este objeto con aquel otro.
¿Por qué interaccionaron?
Por la actuación de tal y tal fuerza.
¿Cuál es el origen de la fuerza?

Y así sucesivamente. Sin embargo, a diferencia de los niños, no nos quedamos tranquilos con el fin de la conversación que impone un padre exasperado al responder: «¡Porque así lo hizo Dios!». Desde luego, hay muchos científicos con creencias religiosas, pero estas interfieren pocas veces en la aspiración de dar respuesta a las preguntas más fundamentales de sus campos de investigación.

Aun así, los físicos teóricos se sienten empujados por algo más que el mero afán de conocimiento a base de profundizar cada vez más en el complejo funcionamiento de la naturaleza. También persiguen patrones y simetrías en la naturaleza que se manifiestan en la simplicidad y la belleza de las ecuaciones matemáticas. Alguna de las mentes más excelsas ha llegado incluso al extremo de rechazar una teoría porque las matemáticas eran demasiado complejas ¡o feas!, aduciendo cosas como: tiene que haber algún error, porque seguro que la naturaleza no puede ser tan torpe en realidad. Quien no sea matemático o físico tal vez los considere motivos irracionales para desechar una teoría, pero parecen funcionar. La búsqueda de las verdades últimas siempre es una búsqueda de la belleza y la simplicidad. Parece que la multitud de fenómenos que observamos a nuestro alrededor, ya sea en la Tierra o deducidos a partir de la luz de una estrella distante, se explican en última instancia mediante una cantidad increíblemente reducida de teorías fundamentales. Toda la mecánica clásica se explica con las leyes newtonianas del movimiento

y de las fuerzas, y las teorías de la relatividad de Einstein las perfeccionaron; la electricidad y el magnetismo resultan ser dos manifestaciones de la misma fuerza electromagnética; y, por supuesto, el comportamiento de todas las partículas subatómicas se describe a través de la mecánica cuántica.

Por tanto, los físicos del siglo XX tuvieron que hacer algo más que limitarse a localizar y clasificar todas las partículas fundamentales. Tenían que desentrañar cómo interaccionan esas partículas entre sí y cuál es el origen de las fuerzas que actúan entre ellas. Y si hubiera distintos tipos de fuerzas, ¿tendrían un origen común? En realidad, la mecánica cuántica de la década de 1920 no fue más que el primer paso para recorrer esa senda. La historia de los avances en física atómica, nuclear y de partículas que conté en el capítulo anterior está, por tanto, incompleta. Porque, durante la búsqueda de la estructura de la materia para descubrir sus elementos constitutivos fundamentales, los físicos también han perseguido la simplicidad y la simetría en sus teorías. El Santo Grial de la física es el descubrimiento de la teoría definitiva de todo, una teoría todopoderosa a partir de la cual se puedan inferir y explicar todos los fenómenos naturales que tienen lugar en el universo[55].

En este capítulo consideraremos qué progresos se han logrado en esta dirección y valoraremos si al fin nos estamos acercando a esa teoría.

La teoría cuántica de la luz

Hasta aquí, siempre que he hablado de la dualidad onda-corpúsculo ha sido dentro del contexto de los objetos cuánticos, como los electrones que se comportan como ondas cuando no los estamos observando, y como partículas cuando sí lo hacemos. Pero el carácter ondulatorio reside en la función de onda, y no quiero repetir otra vez los controvertidos argumentos que circulan en relación con el significado físico de la función de onda. Cuando se trata de luz (y, de hecho, de todas las demás formas de radiación electromagnética), el aspecto de onda es bastante real. Parece que podemos elegir si considerar la luz como una onda física o como partículas físicas, dependiendo de cómo se contemple y del tipo de fenómeno que se estudie.

De hecho, la llegada de la mecánica cuántica no persuadió a los físicos para que abandonaran la clásica teoría ondulatoria de la luz. Esta teoría, formulada por James Clerk Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX, está comprendida en una serie de ecuaciones que llevan su nombre. Maxwell reveló que la luz se compone de una combinación de campos, eléctrico, y magnético, que oscilan en ángulo recto uno respecto del otro y que viajan a una velocidad de 300 000 kilómetros por segundo.

Una característica importante de las ecuaciones de Maxwell es que concordaban con la relatividad especial. A diferencia de las ecuaciones de Newton, que hubo que modificar con la relatividad para que resultaran correctas para velocidades cercanas a la de la luz, las ecuaciones de Maxwell ya eran correctas. Desde luego, si una teoría que describe algo que se mueve a la velocidad de la luz (de hecho, la mismísima luz) no concordara con la relatividad especial, habría planteado cierto dilema.

En cambio, la mecánica cuántica tal como la formularon Heisenberg y Schrödinger, no encajaba con la relatividad especial. Solo conseguía describir el comportamiento de entidades cuánticas como electrones que se movieran con velocidades muy inferiores a la de la luz. De modo que, igual que las ecuaciones de Newton describen con precisión el movimiento de un objeto clásico, como un planeta o un balón de fútbol, pero requieren una modificación con velocidades cercanas a la de la luz, también la ecuación de Schrödinger es aplicable tan solo a objetos cuánticos que se muevan despacio. A velocidades relativistas, la relatividad especial evidencia que empiezan a cambiar valores como la masa, la cantidad de movimiento o la energía de un cuerpo. De ahí que, en última instancia, los valores de esas cantidades en la ecuación de Schrödinger deban reemplazarse por sus versiones relativistas.

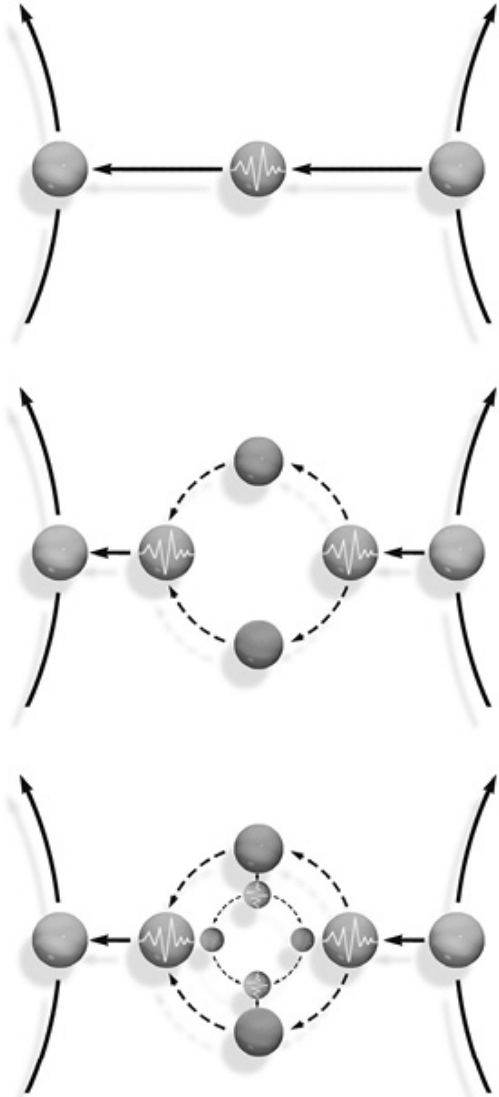
Pondré un ejemplo rápido sobre lo que implica eso. La masa de un objeto se refiere a la cantidad de «materia» que contiene. De hecho, en el lenguaje cotidiano, la masa se usa como sinónimo de peso[56]. Así que consideramos la masa como una cantidad constante que no varía por el mero hecho de que un cuerpo se esté moviendo. Sin embargo, la relatividad especial nos ha enseñado que a medida que el objeto se acerca a la velocidad de la luz su masa empieza a crecer hasta que, al alcanzar la velocidad de la luz, se convertiría en infinita, por eso nada que tenga masa en reposo puede viajar a la velocidad de la luz. Solo

un año después de que Schrödinger publicara su ecuación original, esta fue reformulada con estas modificaciones de manera independiente por Oskar Klein y Walter Gordon, así como por el propio Schrödinger. Pero la nueva ecuación planteaba un problema bastante grave: las probabilidades cuánticas que predecía a partir de la función de onda podían ser ¡negativas! ¿Y qué podía significar en la Tierra decir que un electrón tiene una probabilidad de al menos el 20% de encontrarse en algún sitio?

En 1928, Paul Dirac publicó un artículo titulado «The quantum theory of the electron» [«La teoría cuántica del electrón»] en el que proponía una ecuación alternativa a la de Schrödinger que no solo era «totalmente relativista», sino que además tenía en cuenta el espín del electrón de una manera natural (algo importante en aquel momento para que la teoría explicara los nuevos resultados experimentales). Fue esta ecuación la que condujo a Dirac a la predicción teórica de las antipartículas[57] y la idea de la creación de pares electrón-positrón y su aniquilación.

Un año antes, en 1927, Dirac había publicado asimismo el primer artículo que combinaba la mecánica cuántica con la teoría de la luz de Maxwell para ofrecer la primera teoría cuántica del fotón. Lo que hizo fue «cuantizar» el campo electromagnético.

Después calculó cómo combinar las dos teorías, una de las cuales describía el electrón, y la otra, el fotón. El resultado fue una teoría de la electrodinámica cuántica. Aquel fue el primer ejemplo de lo que se conoce como «teoría cuántica de campos», y explicaba de qué manera emiten y absorben fotones los electrones, y que dos electrones se repelen entre sí mediante el intercambio de un fotón.



La teoría cuántica de campos describe la manera en que interaccionan dos electrones teniendo en cuenta una serie de procesos cada vez más complejos, aunque menos probables, que pueden tener lugar. El proceso «más básico» es que intercambien un único fotón virtual *(arriba)*. Pero otros procesos superiores que también deben contemplarse implican que uno de los electrones emita un fotón que, mientras transita, crea un par electrón-positrón. Estos se destruyen enseguida para volver a generar un fotón que es absorbido por el segundo electrón *(centro)*. Incluso hay una posibilidad pequeña *(abajo)* de que el par electrón-positrón creado por el fotón intercambiado pueda intercambiarse un fotón virtual, que también crea otro par electrón-positrón, y así sucesivamente.

Tras un comienzo prometedor, la teoría cuántica de campos atravesó momentos difíciles en las décadas de 1930 y 1940 al verse plagada de complicaciones matemáticas. Es decir, a diferencia de la

vieja mecánica cuántica, permitía la creación y destrucción de partículas virtuales en todo momento (recordemos que esto es lo que se obtiene al combinar el principio de incertidumbre de Heisenberg con la ecuación einsteiniana $E = mc^2$). Esto significaba que ciertos cálculos realizados usando la teoría arrojaban respuestas infinitas. Ofreceré aquí una explicación poco precisa de por qué sucede esto. La idea básica de la teoría cuántica de campos es que los campos eléctricos se pueden concebir como la incesante aparición y desaparición de muchos fotones virtuales. Así que cuando un electrón intercambia un solo fotón con otro electrón, solo se da el proceso más simple de todos los que pueden ocurrir. Si nos ponemos a analizar distancias más reducidas, nos encontramos con que cada vez suceden más cosas. Por ejemplo, mientras ese fotón virtual viaja entre los electrones, se puede convertir de manera espontánea en un par virtual electrón-positrón que se destruye enseguida para volver a ser el fotón original antes de llegar a su destino. Pero durante la breve existencia del electrón y el positrón virtuales, estos serían capaces también de intercambiar otro fotón virtual, el cual crearía su propio electrón y positrón, y así sucesivamente. Cabría esperar que la posibilidad de esta actividad cada vez más completa pudiera despreciarse en los cálculos, o al menos que se volviera cada vez menos relevante, pero no es así. Da lugar a valores infinitos en los cálculos.

Este problema existe en realidad desde mucho antes que la mecánica cuántica. En el siglo XIX los físicos se encontraban ante la siguiente situación. Una carga eléctrica generará en su derredor un campo eléctrico, pero ¿cómo se calcula el efecto que ejerce ese campo sobre la carga que lo generó en primera instancia? Este es un problema que solo afecta al lugar donde se encuentra la carga, pero se obtiene una respuesta infinita. Esto se debe a que habría que dividir una cantidad determinada entre la distancia que separa el punto que nos interesa de la posición de la carga. Y, en este caso, la distancia es cero, y cualquier número dividido entre cero da infinito.

Los problemas de infinitud que plagaban la teoría cuántica de campos se sortearon finalmente cuando, en el año 1949, los tres físicos Richard Feynman, Julian Schwinger y Shin'ichiro Tomonaga encontraron por separado una manera de refinar los infinitos mediante un truco matemático llamado «renormalización». Lo que se obtuvo fue una teoría que hasta ahora se considera la más exacta de toda la ciencia. Aún recibe el nombre de «electrodinámica cuántica»

(abreviada QED, de acuerdo con su denominación en inglés), y es a esta disciplina a la que se refieren muchos físicos hoy en día cuando usan ese término. Sin embargo, no debemos olvidar que Dirac fue el primero en proponer la QED veinte años antes.

La concordancia de la QED con las mediciones experimentales asciende a una parte entre cien millones. Pero no vaya usted a pensar que se trata tan solo de una descripción impecable de la forma en que las partículas con carga eléctrica se perciben unas a otras mediante el intercambio de fotones. Esta teoría sobre la naturaleza de la interacción de la luz con la materia es la más fundamental y trascendente de toda la ciencia. Todas las leyes y fenómenos de la mecánica, la electricidad y la química derivan de ella en última instancia. Con las excepciones de la fuerza gravitatoria y de las fuerzas que actúan en el interior de los núcleos atómicos, todos los demás procesos de la naturaleza se explican en última instancia mediante la QED: cómo se unen los átomos de hidrógeno y oxígeno para formar una molécula de agua, la naturaleza de la luz solar, cómo aparece la imagen de esta página en la pantalla de mi computadora mientras tecleo, y cómo las señales eléctricas de mi cerebro se convierten en reflejos mecánicos que controlan el movimiento de mis dedos mientras pulso las letras sobre el teclado.

Vemos, pues, que la QED subyace a toda la química (y, por tanto, la biología), ya que en esencia se reduce a la forma en que interaccionan los átomos a través de sus electrones, y esto ocurre mediante la fuerza electromagnética, que no es más que el intercambio de fotones.

A algunos físicos, incluido el propio Dirac, no les gusta la manera en que el truco de la renormalización de la QED trata los infinitos. Viene a ser como barrer debajo de la alfombra los restos incómodos desde un punto de vista matemático. Así que, aunque la teoría resultante funcione de maravilla, los puristas, como Dirac, siempre creyeron que ese truco no debería ser necesario, y esperaban algo más fundamental.

El principal objetivo de la investigación en física fundamental del último medio siglo consistió en algo más grandioso. A pesar de sus éxitos, la QED es una teoría que tan solo describe una de las cuatro fuerzas de la naturaleza. ¿Es posible describir las otras tres fuerzas (la gravitación y las dos fuerzas nucleares) mediante una teoría cuántica de campos, es decir, usando la noción del intercambio de partículas

cuánticas? Mejor aún, ¿existe una sola teoría cuántica de campos capaz de ejecutar el trabajo completo?

Teorías gauge y simetrías

Cuando usamos el término «simétrico» en el lenguaje cotidiano solemos referirnos a algo bastante específico: que un objeto o una figura muestran el mismo aspecto al reflejarse en un espejo, o vistas desde diferentes ángulos. Pero en matemáticas la idea de simetría tiene un significado mucho más poderoso, y ha ayudado a los físicos en su aspiración de unificar las fuerzas en una teoría cuántica de campos.

Por ofrecer una definición más general, diremos que existe simetría cuando alguna propiedad se mantiene idéntica al variar cualquier otra cantidad. De este modo, una esfera sigue mostrando el mismo aspecto desde cualquier ángulo que se mire, y la diferencia de edad entre dos personas se mantiene idéntica con el paso del tiempo. Estas son dos formas de simetría. Los físicos hablan de una simetría «global» cuando ciertas leyes de la física permanecen idénticas al aplicar en todas partes por igual un cambio, o «transformación», particular. Ciertas teorías físicas exhiben una propiedad aún más pura. Por ejemplo, las ecuaciones de Maxwell de la teoría clásica del electromagnetismo permanecen iguales incluso cuando se aplican ciertas transformaciones de forma «local» (es decir, distintas entre un lugar y otro). Esto guarda relación con el hecho de que los campos eléctrico y magnético son en cierto modo equivalentes entre sí.

Para comprobarlo, representemos la energía potencial eléctrica que percibe un electrón como un paisaje montañoso donde los valles simbolizan la atracción, puesto que el electrón caerá rodando en ellos, y las cumbres simbolizan la repulsión, puesto que, si un electrón se sitúa sobre una de ellas, caerá rodando y se alejará. Si se cambiara la forma del paisaje en un lugar determinado, por ejemplo, elevando un valle hasta convertirlo en cumbre, entonces la simetría gauge exige que el electrón se comporte igual que lo habría hecho antes de aplicar ese cambio, es decir, que ruede hacia la cima. Pero para que el electrón haga eso se precisa una carga compensadora en la energía magnética potencial. Se dice que la teoría del electromagnetismo es una teoría gauge con simetría local.

Resulta que la QED tiene esta propiedad. De hecho, se ha descubierto que una teoría cuántica de campos para cualquiera de las cuatro fuerzas de la naturaleza implicaría una simetría gauge como esa. Esto infundió en los físicos la esperanza de que las fuerzas pudieran mantener algún tipo de relación entre sí.

Sé que todo esto suena bastante técnico, pero lo comento por una razón. Lo importante en este debate es la idea de «romper» una simetría. Una hoja de papel en blanco es simétrica en relación con ciertas rotaciones; tiene el mismo aspecto por ambos lados o al invertirla arriba y abajo. Pero en cuanto empecemos a escribir en ella, esa simetría se pierde, o se rompe.

Durante la década de 1960, los físicos recurrieron a este tipo de razonamiento en relación con la simetría para ampliar la QED e incluir en ella la fuerza nuclear débil (que es responsable de la desintegración beta de los núcleos) y la fuerza electromagnética. Se descubrió así que, en determinadas condiciones, la fuerza débil también se podía interpretar como el intercambio de partículas virtuales como los fotones. Y si se rompían ciertas simetrías especiales, entonces el viejo truco de la renormalización aún podría usarse para dotar de sentido a la teoría cuántica de campos de la fuerza débil. A finales de la década de 1960, Steven Weinberg, Abdus Salam y Sheldon Glashow habían desarrollado una teoría de campos ampliada que unificaba las fuerzas electromagnética y débil, y que se conoce como «teoría electrodébil».

Según explicaban, por encima de una temperatura aproximada de mil billones de grados, que sería la que imperaba en los primeros instantes del universo, las fuerzas electromagnética y débil se convertirían en una sola fuerza. Pero a medida que el universo se enfrió y expandió, se rompió cierta simetría, y cristalizaron dos fuerzas muy distintas. Hoy interpretamos que la fuerza débil se debe al intercambio de partículas conocidas únicamente por las letras W y Z. Bueno, sería más riguroso decir que se llaman «bosones portadores débiles», pero es más fácil llamarlos bosones W y Z.

Una fuerza multicolor

En cuanto se supo que la idea de la simetría gauge se aplica a las teorías cuánticas de campos, se avanzó bastante rápido en la

interpretación de la fuerza nuclear fuerte de este modo. Por supuesto, Yukawa había allanado el camino muchos años antes al proponer su teoría del pion, la partícula que podemos suponer que se intercambian los nucleones dentro del núcleo. Pero cuando se descubrió que los propios nucleones están formados por cuarks, se entendió que la fuerza de intercambio también tenía que actuar a un nivel aún más profundo. La teoría de campo de la fuerza nuclear fuerte que se desarrolló se conoce como «cromodinámica cuántica» o QCD (de acuerdo con sus iniciales en inglés).

Permítame que antes de nada le pida que reflexione sobre el significado de la carga eléctrica. Lo único que podemos decir a un nivel fundamental es que se trata de una propiedad de ciertas partículas elementales de la que existen dos clases llamadas positiva y negativa. Las partículas de tipos opuestos se atraen entre sí, y las partículas con la misma carga se repelen. También podríamos haberlas llamado carga dulce y carga salada. Una partícula con carga dulce será atraída por otra de carga salada. Seguro que capta usted la idea. El carácter positivo o negativo de la carga eléctrica es una convención inventada por nosotros.

De la misma manera, la fuerza nuclear fuerte precisaba una convención para nombrar la propiedad de las partículas que notaran su influjo. Y se decidió que tuvieran carga de «color». Para explicar el modelo de los cuarks, es decir, que cada nucleón tenía que contener tres cuarks, tenía que haber tres tipos de esta carga de fuerza fuerte. La analogía del color se eligió debido a la conexión con la manera en que se combinan los distintos colores de la luz. De hecho, el nombre de esta teoría, *cromo,* deriva de la palabra griega *chroma,* que significa «color». Los tres tipos de carga de color fueron, pues, rojo, azul y verde. Un cuark rojo, uno azul y uno verde podrían combinarse para formar algo sin color. La regla era que los cuarks no podrían existir por sí mismos porque tenían color, y solo se permitían las combinaciones carentes de color. Esto se parece a los argumentos esgrimidos mucho antes en relación con la naturaleza de los átomos, que tenían que contener cantidades idénticas de carga positiva y negativa para ser neutros. Aunque en su caso la naturaleza al menos permite que los átomos pierdan o ganen electrones y, de este modo, existan como iones positivos o negativos.

Aunque los cuarks aislados no pueden existir, se está investigando bastante en la actualidad para generar lo que se conoce como un

«plasma cuark-gluon», hecho de cuarks no confinados y partículas de intercambio llamadas gluones. Este plasma se forma cuando dos núcleos pesados colisionan entre sí con energías muy elevadas. Durante una fracción de segundo, las fronteras entre los protones y neutrones inmersos en los dos núcleos se diluyen y solo queda una sopa de cuarks libres y gluones que enseguida se «congelan» en varios hadrones. Se cree que justo después de la Gran Explosión imperaron las condiciones de elevadísima temperatura y densidad necesarias para crear este plasma.

Es importante señalar que los trucos de combinación cromática de cuarks dentro de hadrones se pensaron antes de la aparición de la cromodinámica cuántica. Una gran diferencia entre la QED y la QCD es que en la primera solo hay un tipo de portador de fuerza: el fotón. En la QCD hay ocho clases distintas de partículas de intercambio de fuerza cromática, los gluones, que responden de las distintas maneras en que pueden interaccionar los cuarks de color. En el capítulo anterior comenté que Yukawa había defendido que el pion era la partícula fundamental portadora de la fuerza fuerte al ser intercambiado entre dos nucleones. A un nivel más profundo se ve que los gluones son los verdaderos portadores de la fuerza fuerte.

Por tanto, igual que la teoría electrodébil describe partículas que interaccionan mediante el intercambio de fotones portadores de fuerza o de bosones W y Z, la QCD es la teoría cuántica de campos de cuarks que intercambian gluones.

Sin embargo, aún queda algo por hacer dentro de este ambicioso plan para unificar las fuerzas. Mientras los físicos lograron unificar en una sola teoría las fuerzas electromagnética y débil, aún no han sido capaces de fundir de manera adecuada la teoría electrodébil con la QCD, a pesar de que ambas son teorías cuánticas de campos. Digamos que hay un esquema para combinarlas, pero aún no se ha verificado de forma experimental. Hasta entonces, el esquema que incorpora con poca firmeza tanto la teoría electrodébil como la QCD se denomina en física de partículas «modelo estándar». Funciona muy bien, pero nadie cree que sea la última palabra en esta materia.

Teoría de la Gran Unificación

Una manera de llegar al límite en el que las distintas fuerzas queden

unificadas consiste en analizar escalas de longitud cada vez más pequeñas. La QED explica que un electrón siempre está rodeado por una nube de fotones virtuales y de pares virtuales electrón-positrón que constantemente saltan a la existencia y desaparecen de ella. Toda esta actividad suele enmascarar la carga eléctrica del electrón y acaba produciendo únicamente la carga que observamos en realidad. Esta es otra manera de describir cómo se enfrenta la renormalización a los infinitos. Aquí la infinidad la conforma la propia carga del electrón, pero solo empieza a volverse grande cuando nos concentramos en la nube circundante de partículas virtuales.

A medida que nos acercamos más y más a la fuente de la fuerza electromagnética nos encontramos con que aumenta la intensidad de la fuerza. En el caso de las dos fuerzas nucleares (que son mucho más poderosas que la electromagnética dentro del rango en el que operan –el interior de los núcleos–) sucede lo contrario: cuanto más cortas son las escalas de longitud, más se debilitan esas dos fuerzas. Cuando alcanzamos una escala de distancia tan pequeña comparada con el tamaño de un protón como lo es el protón para nosotros (10^{-28} milímetros), descubrimos que estas tres fuerzas convergen con la misma intensidad. Es ahí donde se pueden considerar una sola fuerza y donde se recupera cierta simetría.

Una teoría que unificara estas tres fuerzas recibiría el nombre de Teoría de la Gran Unificación (TGU, o GUT en inglés). Los físicos llevan tiempo intentando encontrar una teoría así, en la que todo encaje, porque entonces podría reemplazar al modelo estándar, que es menos satisfactorio y ofrece una alianza laxa entre la teoría electrodébil y la QCD. Un problema especialmente molesto que se resolvió en la década de 1970 guardaba relación con la escala de longitud en la que coincide la intensidad de esas tres fuerzas. En el instante preciso de nuestra ampliación en el que las fuerzas electromagnética y débil confluyen, y empieza a actuar la fuerza electrodébil, la fuerza fuerte aún es demasiado intensa y la simetría permanece rota. Para una verdadera simetría, debe haber una confluencia simultánea de las tres.

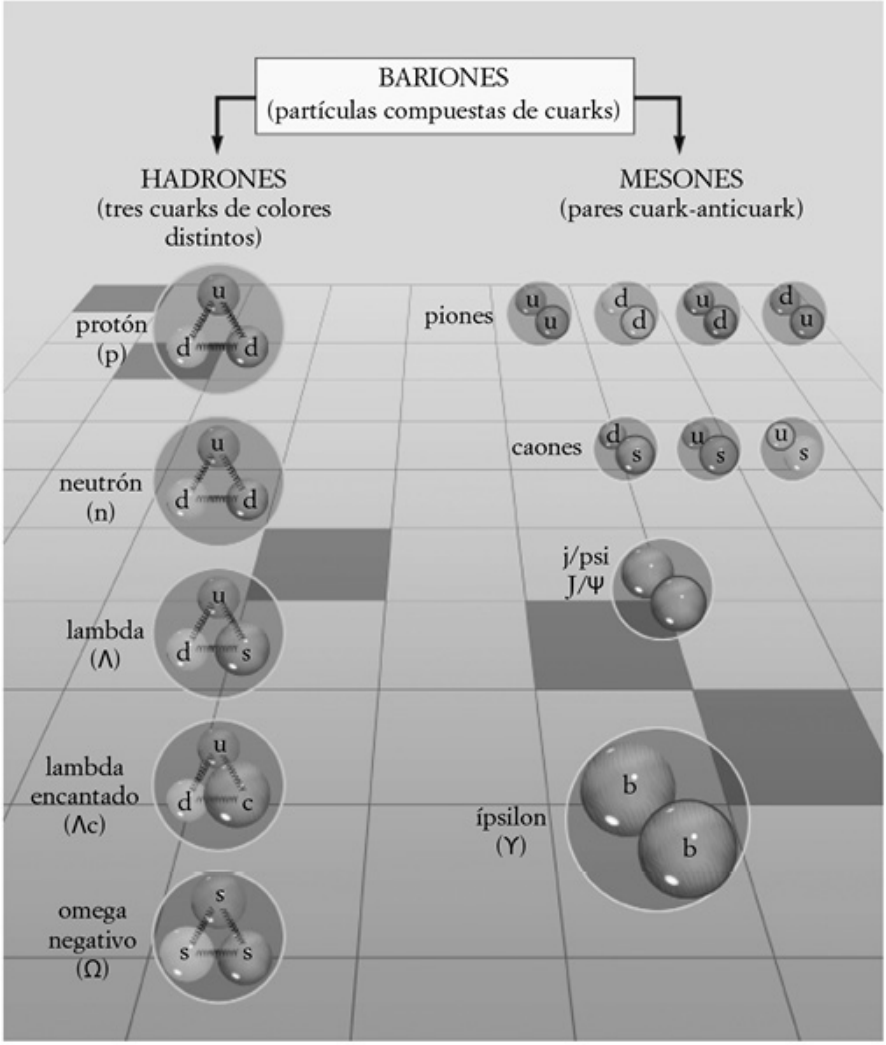
Después se descubrió una clase nueva de simetría más potente incluso que la necesaria para unificar las fuerzas electromagnética y débil. Se conoce como «supersimetría» y es una manera matemática de resolver este problema. En esencia, revela la simetría, o conexión, entre electrones, neutrinos, fotones y bosones W y Z, por un lado (las

partículas descritas mediante la teoría electrodébil), y los cuarks y gluones, por otro (las partículas QCD). Su predicción fundamental es que cada una de las partículas conocidas posee una compañera «supersimétrica» de carácter opuesto. Así, el electrón llevaría asociado el selectrón (un bosón), y el fotón tendría el fotino (un fermión). La supersimetría también predice que un protón podría desintegrarse en un positrón más un pion. Si este proceso pudiera detectarse en la naturaleza, supondría un indicio sólido en favor de la Teoría de la Gran Unificación. De momento aún no se ha observado la desintegración del protón, pero sería algo tan poco frecuente que siempre cabe la posibilidad de que lo hayamos pasado por alto. Sencillamente aún no sabemos si la naturaleza también se comporta de un modo supersimétrico. Pero puede que la supersimetría desempeñe un papel más fundamental, con un cometido que haga que la Teoría de la Gran Unificación parezca muy limitada a su lado.

¿Qué hay de la gravitación?

¿No nos olvidamos de algo? Parece poco significativo, cuando no una impertinencia, hablar de Teoría de la Gran Unificación si solo aspiran a abarcar tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza. Hasta ahora no he dicho nada sobre cómo encaja la fuerza de la gravitación en todo ello. No es que la gente no lo haya intentado (Einstein pasó los últimos treinta años de su vida buscando en vano una teoría de campos que unificara el electromagnetismo con la gravitación).

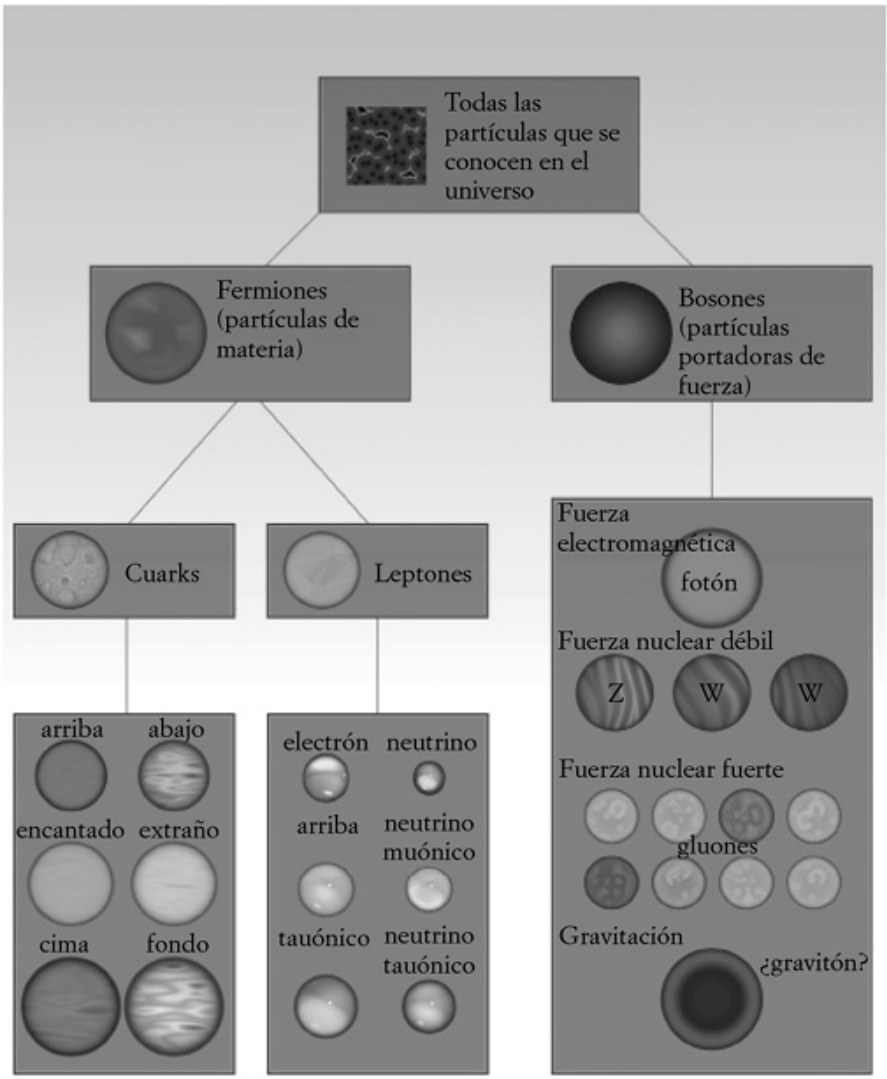
En cierto sentido, no debemos sentir lástima por la fuerza gravitatoria. Después de todo, está descrita por una teoría que algunos consideran más bella, más poderosa y hasta más fundamental que cualquier teoría cuántica de campos: la relatividad general. (Toques de trompetas, estremecimiento por toda la espalda, etcétera).



Una pequeña selección de los bariones. Estas partículas se componen de cuarks y perciben la fuerza nuclear fuerte mediante el intercambio de gluones. Los hadrones se componen de tres cuarks de colores distintos que permanecen unidos por gluones. Los mesones consisten en pares cuark-anticuark.

Con su teoría especial de la relatividad, Einstein evidenció que no existe eso del espacio y el tiempo absolutos, puesto que dos observadores no podrían ponerse de acuerdo exactamente al medir distancias e intervalos temporales. Solo la combinación del espacio y el tiempo en un espacio-tiempo tetradimensional permite dar verdadero sentido a las cosas. En 1915 Einstein completó su aportación más grandiosa a la ciencia. La relatividad general fue una ampliación de su teoría especial para incluir la fuerza gravitatoria. Sin

embargo, la descripción de esta fuerza no podría apartarse más de la imagen del intercambio de partículas que nos proporciona la teoría cuántica de campos para describir las otras tres fuerzas. En lugar de eso, Einstein describió la gravitación en términos de geometría pura. Todo lo que alberga el universo intenta acercar hacia sí todo lo que hay a su alrededor. Pero en la relatividad general, la fuerza de atracción gravitatoria se debe a la curvatura del propio espacio-tiempo. Cuanto mayor sea la masa de un objeto, más se curva el espacio y el tiempo que lo circundan.



Todas las partículas elementales se pueden agrupar en dos categorías: las partículas de materia (fermiones) y las partículas de fuerza (bosones).

La excepcional exactitud de la relatividad general se ha demostrado de manera experimental. Es la mejor teoría actual sobre la naturaleza del espacio y el tiempo en sí; ¡muy buen material!

Ahora nos hemos dado cuenta de que para unificar las cuatro fuerzas de la naturaleza, habría que hallar un modo de combinar la relatividad general con la teoría cuántica de campos (que no es más que una manera elegante de decir la mecánica cuántica)[58]. El problema es que esas dos teorías apenas tienen nada en común, aparte del hecho de que ambas se aproximan a la física newtoniana cuando se aplican a la escala cotidiana. Se alejan de este límite en los extremos de los objetos y distancias muy reducidos (mecánica cuántica) y de los objetos y distancias muy grandes (relatividad general). Pero a partir de ahí abordan estructuras matemáticas muy dispares, lo que las vuelve incompatibles.

Con todo, a finales del siglo XX lo que realmente se buscaba era la teoría definitiva, una teoría de la gravitación cuántica.

La lección de Planck

La búsqueda de una teoría de la gravitación cuántica que unifique las cuatro fuerzas es hoy un emocionante campo de investigación teórica. En lo que queda de capítulo perfilaré algunas de las ideas básicas relacionadas con él.

Quienes trabajan en la materia se dividen en dos grandes grupos. Uno sostiene que la mecánica cuántica contiene los conceptos más fundamentales, y que habría que empezar por ella hasta incorporar la relatividad general. El otro grupo discrepa y prefiere partir de la relatividad general, con sus nociones fundamentales de espacio y tiempo, e intentar cuantizarla. Por supuesto hay otros físicos que creen que ninguna de las dos tendencias sobrevivirá completamente intacta y que ambas precisarán una gran intervención antes de poder injertarlas en la gravitación cuántica. Una minoría aún más reducida de concienzudos pensadores defiende incluso que el camino correcto consiste en desechar tanto la mecánica cuántica como la relatividad general, y empezar de cero. Pero como cada una de estas teorías funciona tan bien en su dominio particular, es difícil creer que ninguna de las dos incluya verdades fundamentales de la naturaleza.

Pero al menos hay una cuestión en la que todos los que trabajan en

gravitación cuántica están de acuerdo: debemos seguir la lección de Planck de hace cien años, cuando echó a rodar la bola cuántica al plantear que la energía no puede subdividirse infinitamente, sino que se compone de pedazos irreducibles, o cuantos de energía, igual que la materia se compone en última instancia de elementos constitutivos fundamentales. Los estudiosos de la gravitación cuántica saben ahora que el espacio y el tiempo en sí también tienen que estar formados en última instancia por paquetes irreducibles. Y, en honor al padre fundador de esta idea, la escala de longitud y de tiempo en la que tiene que darse esta cuantización se conoce como la «escala de Planck». Y es a esta escala, que se puede considerar una escala de distancias o una escala de energías/temperaturas, donde todas las fuerzas están unificadas.

Entonces, ¿qué tamaño tiene la unidad más pequeña de espacio, un cuanto de volumen? Veamos esto en perspectiva: hay más átomos en un solo vaso de agua que la cantidad de vasos de agua necesarios para llenar todos los océanos y mares del mundo. Así que los átomos son minúsculos. Después, podríamos meter un billón de núcleos atómicos en el espacio de un solo átomo. De modo que los núcleos son mucho más pequeños aún. Pues bien; tomemos una buena bocanada de aire; un núcleo atómico puede alojar tantos volúmenes cuánticos como metros cúbicos hay en nuestra Galaxia (alrededor de 10^{62} m^3). Y la Galaxia no es lo que se dice un lugar pequeño: mide ochenta mil años-luz de ancho y contiene cien mil millones de estrellas. Duele la cabeza solo con pensarlo.

Esta noción de la unidad más pequeña de espacio significa que no tiene sentido hablar de reducir ese volumen a la mitad.

Y ¿qué hay de la duración de una unidad cuántica de tiempo? Esta es tan breve que ni se me ocurre una buena analogía con la que impresionar. Baste decir que hay muchos, muchísimos más cuantos de tiempo en un solo segundo (10^{43} de ellos) que la cantidad de segundos transcurridos desde que nació el universo (menos de 10^{18}).

Teoría de cuerdas

La mayoría de quienes se dedican a la gravitación cuántica pertenecen al bando que está intentando aprovechar la mecánica cuántica. Aducen que el empleo de ideas como la teoría cuántica de campos y la

supersimetría nos ha llevado tan lejos en el conocimiento de tres de las cuatro fuerzas en términos mecánico-cuánticos, que sin duda la gravitación también se podrá encajar. De hecho, están desarrollando una teoría candidata, llamada «teoría de cuerdas», que persigue justo eso. Describe la fuerza gravitatoria como el intercambio de una partícula llamada gravitón. Pero la teoría de cuerdas, tal como indica su nombre, se diferencia bastante de las teorías cuánticas de campo previas. Afirma que todas las partículas fundamentales son en realidad minúsculas cuerdas en vibración. Las distintas frecuencias a las que vibran estas cuerdas dan lugar a las diversas partículas elementales.

La primera versión de la teoría de cuerdas se basó en ideas desarrolladas en 1968 por Gabriele Veneziano. Pero esta teoría adolecía de una serie de problemas tales como la predicción de partículas más veloces que la luz, llamadas taquiones, que es algo que los físicos ya no aceptan como posibilidad. Entonces, a mediados de la década de 1980, se produjo la primera revolución de cuerdas. En un artículo histórico de John Schwarz y Michael Green, se aplicaba la idea de la supersimetría a las cuerdas de Veneziano, y eso resolvió los problemas. La nueva versión se conoció como «teoría de supercuerdas» y se anunció como la definitiva teoría del todo.

Sin embargo, después del entusiasmo inicial, el avance en la investigación de la teoría de supercuerdas se frenó por dos razones. En primer lugar, las matemáticas eran tan complejas que nadie sabía siquiera qué significaban las ecuaciones. De hecho, ha llegado a afirmarse que algunos de los métodos matemáticos necesarios para resolver la ecuaciones como es debido ¡aún no se han inventado! El segundo problema era más desalentador. A comienzos de la década de 1990, había cinco versiones distintas de la teoría de cuerdas y nadie sabía cuál era la correcta. La materia se estancó un tanto y los expertos empezaron a tener dificultades para convencer a los nuevos investigadores de que se unieran a ellos para realizar sus tesis doctorales sobre la materia. Parecía haber perdido su *sex appeal*.

Entonces, en 1995, se produjo la segunda revolución de cuerdas. Se propuso un esquema nuevo, aún más amplio, que unificaba las distintas teorías de supercuerdas bajo un paraguas único. Se conoce como «teoría M», donde la «M» significa «membrana». La teoría M predice que las cuerdas no son las únicas entidades fundamentales de nuestro universo, sino que también debería haber láminas bidimensionales o membranas y hasta extrañas manchas

tridimensionales. Pero de momento nadie sabe ni siquiera qué aspecto tienen las ecuaciones de la teoría M, y muchos prefieren decir que la M significa «misterio». Lo que sí se sabe es que la teoría M predice que en realidad moramos en un espacio decadimensional (aparte de la dimensión del tiempo, lo que lo convierte en un espaciotiempo endecadimensional). Sin embargo, seis o siete dimensiones del espacio se encuentran tan enroscadas que son más pequeñas que cualquier cosa a la que se pueda acceder con los aceleradores de partículas actuales. Están atrapadas dentro de las cuerdas y membranas.

La lección de Einstein

Un grupo aún más reducido de investigadores que la comunidad de la teoría de cuerdas está trabajando en la otra dirección. Parten de la relatividad general y la modifican con la esperanza de conseguir una teoría cuántica del espaciotiempo. Algunos estudiosos creen que han encontrado la manera de hacerlo. Su teoría recibe el nombre de «gravitación cuántica de lazos» y en este campo se han logrado avances constantes a lo largo de la última década o las dos décadas pasadas. La gravitación cuántica de lazos también predice que el espacio y el tiempo se manifiestan en última instancia en paquetes indivisibles a la escala de Planck. Pero hay una diferencia crucial entre este planteamiento y la teoría de cuerdas. En esta última, el espacio y el tiempo se siguen considerando como un trasfondo absoluto: un escenario sobre el que las cuerdas practican su danza. Esta formulación contradice uno de los postulados de las teorías de Einstein: que el espacio y el tiempo solo pueden definirse en realidad en términos de relaciones entre distintos acontecimientos. Dicho llanamente, sería como afirmar que la distancia entre dos puntos existe únicamente porque existen los puntos de por sí.

La gravitación cuántica de lazos parte de una concepción correcta del espacio y el tiempo. Sus «lazos» no son, pues, entidades físicas como las supercuerdas. Sino que lo único real es la relación entre los lazos. Por desgracia, lo que no puede hacer la gravitación cuántica de lazos es predecir las propiedades de las cuatro fuerzas de una forma unificada.

Tal vez haya que trabajar más para salvar la separación entre la mecánica cuántica y la relatividad. O quizá la clave esté en la teoría

M. No nos queda más remedio que esperar a ver qué pasa.

Pongamos el acento en lo negativo

Paul Davies, profesor de Filosofía Natural, Universidad Macquarie de Sidney

Cuando Stephen Hawking anunció en 1974 que los agujeros negros no son negros, sino que irradian calor y se evaporan poco a poco, la gente se quedó preguntándose de dónde salía esa energía calorífica. Si se supone que nada puede escapar de un agujero negro, ¿cómo puede suministrar energía para alimentar la emisión de calor? La respuesta se encontró con rapidez. El calor que irradia un agujero negro se debe, no a un flujo de energía que sale del agujero, sino a un flujo de energía negativa que cae en él.

En términos sencillos, un estado de energía negativa es aquel con menos energía que otro con un campo gravitatorio que vale cero. Pero ¿cómo puede haber menos masa, o energía, que en un espacio completamente vacío? El secreto radica en la mecánica cuántica o, más exactamente, en la teoría cuántica de campos. De acuerdo con esta teoría, el espacio que parece vacío no lo está en absoluto en realidad, sino que está repleto de todo tipo de partículas virtuales que existen tan solo de manera fugaz. El estado llamado «vacío cuántico» no se puede desligar de estas innumerables entidades fantasmagóricas, aunque no tengan ninguna energía medible, y por tanto ningún empuje gravitatorio en general. De hecho, las partículas virtuales se manifiestan tan solo cuando algo altera el vacío cuántico.

Un ejemplo sencillo de vacío cuántico alterado lo representa el conocido efecto Casimir, descubierto en 1948. Dos espejos colocados uno frente al otro retienen una capa de vacío cuántico entre sí. Los espejos reflejan fotones de luz reales, pero también reflejan fotones virtuales fantasmagóricos. Esto altera la cantidad de energía del vacío cuántico y, al efectuar las sumas, se obtiene que la energía total del estado de vacío cuántico modificado entre los espejos es inferior al del estado no modificado, ese en el que no hay espejos, es decir, el espacio vacío. Así que los espejos paralelos reducen la energía por debajo de la que hay en el espacio vacío, lo que la vuelve negativa para la definición que le da la mayoría de la gente. Esta energía negativa se manifiesta como una fuerza medible de atracción entre los espejos.

En la década de 1970, Stephen Fulling y yo descubrimos, mientras usábamos la teoría cuántica de campos, que los estados de energía negativa se pueden crear con un solo espejo si se mueve de una forma determinada. Es más, nuestros cálculos revelaron que la energía negativa fluiría fuera del espejo a la velocidad de la luz, lo que abría la posibilidad a un haz de energía negativa, en oposición a la energía negativa estática asociada al efecto Casimir. Poco después se descubrió que la mezcla de rayos láser podía dar lugar a breves estallidos de energía negativa, a partir de lo que se conoce como «estados comprimidos». Estos estados se han verificado recientemente en laboratorio.

Una vez asentada la posibilidad de flujos de energía negativa, Fulling y yo no tardamos en demostrar que la radiación de los agujeros negros de Hawking se impulsaba de esta manera. A cierta distancia, la radiación calorífica representa un flujo de energía positiva que sale del agujero negro. Sin embargo, sabíamos que no se puede trazar el camino seguido por este flujo de energía hacia atrás, hasta el interior del agujero negro, porque eso violaría la regla de que nada puede salir de estos objetos. Lo que descubrimos fue que hay un flujo continuo de energía negativa que se precipita al interior del agujero desde la región circundante. Como resultado de la acumulación incesante de energía negativa en el interior del agujero negro, su masa decrece. Nuestros cálculos confirmaron que el agujero negro pierde masa-energía exactamente al mismo ritmo al que debe producirse la fuga de radiación calorífica. Los agujeros negros, y de hecho todos los objetos esféricos, crean energía negativa de vacío cuántico en su entorno porque la curvatura del espaciotiempo debida a su campo gravitatorio altera la actividad de las partículas virtuales. Gracias a una de estas agradables coincidencias, la curvatura del espacio que se forma cuando explota una estrella y da lugar a un agujero negro, resultó tener un efecto matemático idéntico en el vacío cuántico que un espejo acelerado.

La posibilidad teórica de crear un flujo de energía negativa, en la práctica un haz de frío y oscuridad, en lugar de calor y luz, arrojaba algunos escenarios singulares y sorprendentes.

Supongamos que dirigimos un haz así hacia un objeto caliente distinto de un agujero negro, como un horno con una abertura protegida por una cortinilla. Podría parecer que el contenido del horno pierde energía y se enfría. Pero eso quebrantaría con claridad la conocida segunda ley de la termodinámica, porque la pérdida de calor del horno supondría asimismo una pérdida de entropía[59], y la segunda ley prohíbe que descienda la entropía de un sistema cerrado. (El haz en sí tiene entropía cero). La segunda ley es el elemento fundamental de la termodinámica, y cualquier violación de esta abriría la puerta a una máquina de movimiento perpetuo, la cual no se considera posible).

Pero otro escenario relacionado con la energía negativa y que también conduce a una paradoja es el de los agujeros de gusano en el espacio, famosos gracias a Jodie Foster en la película *Contact*. Los agujeros de gusano son túneles o tubos hipotéticos de espacio que unen puntos distantes a través de un atajo. Si existieran, se podrían usar como máquinas del tiempo. Hay circunstancias en las que un astronauta que atraviese un agujero de gusano, llegue a un lugar remoto y regrese a casa por el espacio normal, podría estar de vuelta ¡antes del momento en que partió! Por tanto, la mera existencia de los agujeros de gusano nos amenaza con una paradoja. Los modelos matemáticos desarrollados por Kip Thorne y sus colaboradores en Caltech desvelaron que los agujeros de gusano son posibles desde un punto de vista teórico, pero solo pueden recorrerse si a su entrada se puede crear alguna suerte de estado de energía negativa. Esto es necesario porque la gravitación amenaza con aplastar el agujero de gusano antes de que nada consiga atravesarlo. Como la energía negativa tiene masa negativa, ejerce una fuerza gravitatoria negativa que se opone al efecto aplastante y mantiene abierta la entrada. Por tanto, una vez más, la energía negativa no restrictiva parece conducir a una paradoja no física.

Aunque las paradojas recién mencionadas incomodan a los físicos teóricos, nadie ha demostrado aún la imposibilidad de que existan los flujos o baños continuados de energía negativa. Sigue sin esclarecerse si, por ejemplo, hay suministros ilimitados de energía desaprovechados en el vacío cuántico.

55. Un llamamiento a la prudencia sobre el reduccionismo: la mayoría de los fenómenos naturales son complejos, y muchas de sus propiedades se manifiestan únicamente a una escala macroscópica. Así, el estudio de una sola molécula de H2O no arroja ninguna pista sobre la «humedad» del agua.

56. La diferencia estriba en que, en el espacio exterior, no pesamos nada, porque no impera ninguna fuerza de la gravedad, pero nuestra masa permanece idéntica.

57. Planteadas por primera vez en una carta que Dirac escribió a Bohr en 1929.

58. No hay que confundir la combinación de la mecánica cuántica y la relatividad general con el logro que alcanzó Dirac en 1928 al unir la mecánica cuántica con la relatividad especial. Aquello no fue más que un juego de niños comparado con esto. Al fin y al cabo, la relatividad especial es una teoría libre de fuerzas.

59 1. La entropía es un valor bastante extraño y mide la cantidad de desorden de un sistema físico. Por ejemplo, cuando barajamos un mazo de cartas se aumenta su entropía.

9. La cuántica en acción

A estas alturas espero haberlo convencido de lo fundamental que es la mecánica cuántica para gran parte de la física y la química modernas. Por supuesto, es posible que sea usted una persona lo bastante dura como para pensar que todo esto es muy fascinante, pero apenas relevante para la vida cotidiana. Al fin y al cabo, el mundo de las experiencias y los sentidos está muy apartado de toda esa rareza cuántica que habita en las profundidades de la escala microscópica; es indudable que no puede afectarnos directamente. Así que en este capítulo indagaremos en cómo se ha aprovechado parte de la física cuántica que hemos estado analizando, para desarrollar a lo largo del último medio siglo diversas tecnologías que hoy damos por sentadas.

Por ejemplo, cierta propiedad de las funciones de onda del electrón (el hecho de que obedezcan el principio de exclusión de Pauli) explicó de qué manera se organizan los electrones en «capas» de energía dentro de los átomos, lo que permitió desentrañar cómo conducen la electricidad los metales. Esto, a su vez, llevó al estudio de materiales superconductores y a la invención del transistor, a partir del cual se desarrollaron el microchip, la computadora e internet.

Es más, los reproductores de CD y DVD se sirven de una propiedad equivalente de los fotones que nos proporciona el láser, un dispositivo con toda clase de aplicaciones industriales, médicas y de investigación, por no hablar del ocio y el entretenimiento.

El fenómeno del efecto túnel nos brindó la energía nuclear, y confiamos en que algún día nos conduzca hasta una fuente más limpia de energía ilimitada: la fusión nuclear.

Otra extraña propiedad cuántica de ciertos materiales enfriados casi hasta el cero absoluto nos dotó de superconductores, que algún día nos brindarán la solución definitiva al problema de la conservación de la energía: cables sin ninguna resistencia eléctrica.

Y ¿pensaba usted que la radiactividad es mala para la salud? ¿Y si le dijera que ha revolucionado la medicina? ¿Y cómo cree que funcionan los detectores de humo?

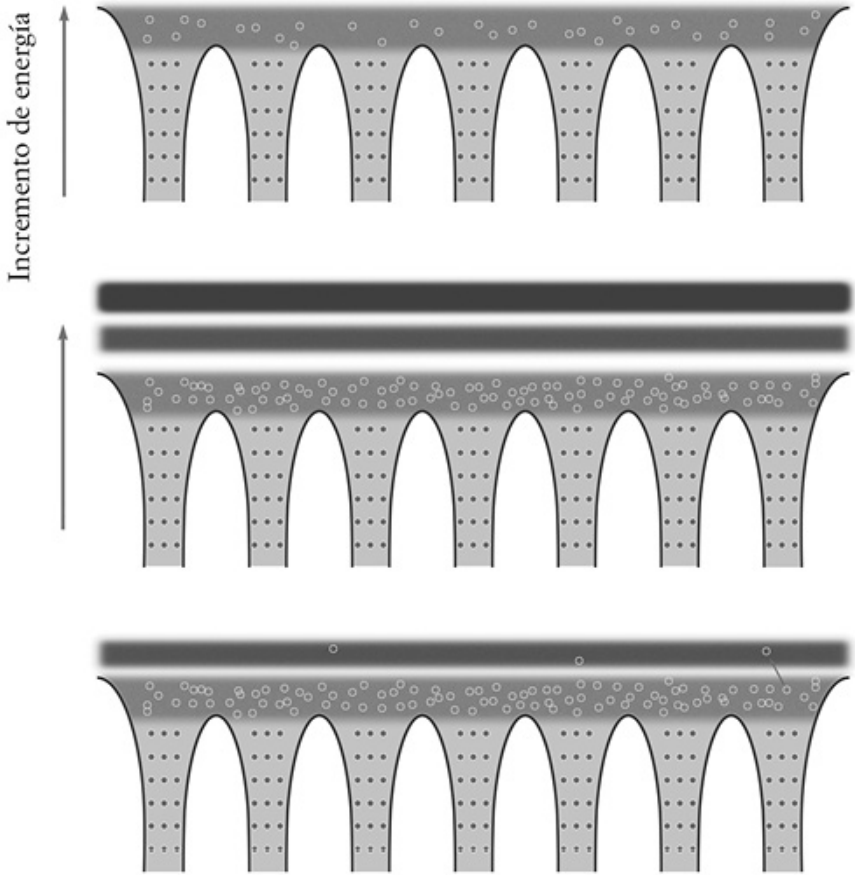
La lista es muy larga, pero me centraré tan solo en algunos de los

avances tecnológicos más relevantes que se basan directamente en la mecánica cuántica.

La era del microchip

Hoy en día parece que todo, desde los coches hasta las lavadoras, desde las máquinas de café hasta las tarjetas para felicitar los cumpleaños, incorpora un microchip en su interior. Pero ¿se ha preguntado alguna vez cómo funciona un chip?

En el recuadro dedicado al principio de exclusión de Pauli del Capítulo 7, describí cómo los electrones dentro de los átomos se disponen de tal modo que dos de ellos no pueden ocupar el mismo estado cuántico. Es decir, no pueden estar descritos por la misma función de onda, sino que deben diferir en algo: en energía, en momento angular orbital o en la dirección de su espín. Esto se debe a que los electrones, junto con los otros elementos constitutivos esenciales de la materia, los cuarks, pertenecen a la clase de partículas elementales llamadas fermiones (los cuales deben su nombre al gran físico italiano Enrico Fermi). Se dice que los fermiones obedecen el principio de exclusión y que prefieren reservarse para ellos solos, cada uno el suyo, su estado cuántico exclusivo. Las partículas portadoras de fuerza, como los fotones, pertenecen a la clase llamada bosones, que son mucho más sociables y no tienen ningún problema (de hecho lo prefieren) en tener funciones de onda idénticas y en ocupar el mismo estado cuántico. El principio de exclusión no se aplica a los bosones.



Energías de electrones en sólidos. Cada espacio sombreado representa un solo átomo en la red cristalina. Muchos electrones están muy apretados dentro de los átomos que los alojan, y ocupan órbitas cuánticas discretas, por lo que no se mueven por la red. Sin embargo, los niveles energéticos más elevados que ocupan los electrones exteriores se funden para formar «bandas de energía», cada una de ellas con un intervalo continuo de energías permitidas. En medio de estas bandas hay huecos energéticos que los electrones tienen prohibido ocupar. En un metal conductor *(arriba)* la banda más elevada (de valencia) solo está parcialmente llena de electrones, de modo que estos se mueven con libertad por la red y, por tanto, conducen la electricidad. En un aislante *(centro)* la banda de valencia está completamente llena, y las reglas cuánticas prohíben moverse a los electrones. Como el hueco hasta la siguiente banda es demasiado grande para que lo salten, se quedan estancados. En un material semiconductor *(abajo)* la banda de valencia también está llena, pero el hueco hasta la banda siguiente es muy pequeño y algunos electrones son capaces de saltarlo y crear una banda conductora nueva.

Las reglas del la mecánica cuántica nos han permitido comprender la estructura de los átomos. Los electrones más exteriores del átomo definen sus propiedades químicas, que a su vez explican cómo se unen los átomos entre sí para formar distintos materiales. Cuando los átomos se amontonan en un trozo de materia, los electrones más

exteriores se encuentran con que tienen un poco más de libertad. En lugar de ocupar un nivel energético determinado, ahora pueden abarcar todo un amplio rango de energías llamado banda de valencia. De hecho, dada la gran cantidad de átomos implicados, las energías permitidas en esta banda mantienen un espaciamiento tan estrecho que cabe considerar que los electrones pueden moverse por un intervalo de energías prácticamente continuo.

En ciertos materiales, como los metales, esta banda de valencia solo está cubierta de manera parcial, y el principio de Pauli no limita el movimiento de los electrones. Cuando se aplica un voltaje a través de un metal, estos electrones de valencia se desplazan por él libremente, y forman una corriente eléctrica. La banda de valencia recibe el nombre de «banda de conducción» en el caso de estos materiales denominados conductores eléctricos.

En cambio, sin un material se compone de átomos con una banda de valencia llena, entonces todos los estados de la banda están ocupados y los electrones no tienen ningún lugar al que ir. Los electrones en la banda de valencia ya no pueden desparramarse con libertad y no se habla de banda de conducción.

Por lo común hay un hueco antes de que empiece la siguiente banda energética. Si este hueco es demasiado amplio, entonces los electrones se limitan a quedarse donde están, ya que son incapaces de saltarlo para liberarse. Y si no pueden llegar a esta banda, serán incapaces de circular por el material cuando se aplique una diferencia de potencial eléctrico. Estos materiales son aislantes.

Los materiales con estructuras atómicas intermedias entre la de los conductores y los aislantes poseen una propiedad bastante interesante. Los átomos de una red cristalina de silicio, por ejemplo, tienen una banda de valencia repleta de electrones, pero el hueco de energía entre esta y la banda inmediatamente superior es salvable, de modo que algunos de los electrones más energéticos pueden saltar a la banda superior, con lo que la convierten en una banda de conducción. Estos materiales se denominan, por tanto, «semiconductores». Una sutileza adicional es que si un electrón dentro de un semiconductor se escapa de la banda de valencia y queda libre, dejará un hueco tras de sí que podrá ocupar otro electrón de un átomo vecino. Este, a su vez, deja un hueco en la banda exterior del átomo vecino. Por tanto, una corriente eléctrica que impulse los electrones en una dirección también provocará que el hueco positivo[60] se desplace en la dirección

opuesta, de modo que se consigue un efecto eléctrico doble.

En el silicio puro, el proceso anterior rara vez ocurre porque un electrón excitado volverá a caer enseguida, bien en su posición original, bien en un hueco de un átomo cercano. A temperatura ambiente solo uno de cada diez billones de átomos de silicio aporta un electrón conductor. Este número se puede elevar aumentando la temperatura, ya que esto proporciona energía adicional para excitar más electrones.

Pero otro modo de lograr un incremento considerable de la conductividad para un semiconductor consiste en añadir cantidades minúsculas de un elemento distinto, las llamadas impurezas. Hay dos tipos de impurezas, dependiendo de si sus átomos aportan electrones adicionales para potenciar la conductividad o para eliminar electrones de silicio y crear huecos, lo que también potencia la conductividad. Los dos tipos de semiconductores que se crean de este modo se conocen como de «tipo *n»,* porque añaden cargas negativas, y de «tipo *p»,* porque incrementan la cantidad de huecos positivos mediante el robo de electrones.

Todo esto es importante porque cuando se juntan las bandas de semiconductores de tipo *n* y de tipo *p* forman un «interruptor» eléctrico que recibe el nombre de «unión *p-n»,* y que controla el flujo de corriente de una manera muy ingeniosa. Dicho dispositivo se denomina «diodo» y tiene la propiedad de que permite que la corriente circule por él con mucha más facilidad en una dirección que en la contraria. El principio básico es el siguiente: cuando los dos tipos de semiconductores entran en contacto, algunos de los electrones libres del tipo *n* migran al otro lado y anulan los huecos que hay en la parte del semiconductor de tipo *p*. Esto provoca la formación de una capa fina en la frontera que tiene carga negativa en el lado del tipo *p* (puesto que ha perdido sus huecos negativos) y carga positiva en el lado del tipo *n* (porque cedió algunos de sus electrones). Esta capa «de deplexión» actúa como una vía de un solo sentido para el flujo de corriente que la atraviesa porque funciona como una válvula eléctrica: permite el paso de la corriente con mucha más facilidad en un sentido (del tipo *p* al tipo *n)* que en el sentido opuesto.

Estos diodos semiconductores tienen gran variedad de aplicaciones. Por ejemplo, se puede hacer que emitan luz cuando la corriente pasa por la unión, y crear así un «diodo emisor de luz», o LED, como se conoce habitualmente por sus siglas en inglés *(light emitting diode)*.

Pero el uso más célebre, con gran diferencia, de los diodos consiste en formar un «transistor».

Poco después de la Segunda Guerra Mundial, tres estadounidenses llamados John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, inventaron los primeros transistores mientras trabajaban en los Laboratorios Bell. La idea básica consiste en usar dos uniones *p-n* seguidas. Según cómo se haga se podrán obtener dos tipos de lo que se denomina transistor de unión bipolar que tenga una disposición *n-p-n* (un semiconductor de tipo *p* en medio de dos de tipo *n)* o una disposición *p-n-p* (uno de tipo *n* entre dos de tipo *p)*. Una corriente elevada que atraviese una de las uniones en el sentido de alta resistencia (difícil) se puede controlar mediante un flujo de corriente mucho más bajo que pase por la otra unión en la dirección fácil. El término *transistor* procede de la combinación de las dos palabras inglesas que describen los procesos que se dan en este dispositivo: *transfer-resistor* (o «resistor de transferencia»).

Con su capacidad para amplificar corrientes y voltajes a través de sus terminales, los transistores se convirtieron en instrumentos perfectos para conformar puertas lógicas, las unidades esenciales de una computadora u ordenador. Operan siguiendo las reglas de la lógica binaria de ceros y unos, que los mantiene o bien «encendidos», si llevan corriente, o bien «apagados» si por ellos no pasa corriente.

Los transistores constituyen una parte de los circuitos eléctricos, que contienen otros componentes eléctricos diversos, como las resistencias y los condensadores. A finales de la década de 1950 se reparó en que se podía montar un circuito así a partir de un solo bloque de material semiconductor para crear lo que se conoce como «circuito integrado». Para ello se usaron pequeños fragmentos o lascas (en inglés *chips,* de ahí su nombre popular) de una oblea de silicio.

Poco después, empezaron a producirse en masa tales chips, que no tardaron en reemplazar las engorrosas y complicadas válvulas de tubos de vacío que se habían usado con la primera generación de computadoras de las décadas de 1940 y 1950. A finales de los años sesenta cada chip podía incorporar miles de transistores en su circuito integrado. Los microchips más potentes de hoy portan, literalmente, millones de transistores apretados en un área del tamaño de una uña. Y, más aún, los «microprocesadores» no solo se montan para realizar una tarea específica, sino que se pueden programar para efectuar gran cantidad de funciones.

Aunque debemos a la mecánica cuántica la tecnología necesaria para los ubicuos microchips, la forma en que se organizan los electrones dentro de los átomos, que es lo que da lugar a materiales semiconductores, no debe contemplarse como un comportamiento cuántico especialmente extraño. De ahí que me sienta obligado a mencionar otro instrumento que también se emplea en los circuitos electrónicos modernos que hace un uso más directo de la mecánica cuántica. El diodo de efecto túnel aprovecha la capacidad de los electrones para saltarse una capa aislante que no deberían poder atravesar en absoluto. Pero no debemos caer en la tentación de imaginarlos como partículas minúsculas que saltan por encima de una pared en un sentido clásico; lo cierto es que las funciones de onda del electrón se filtran a través de la región aislante. Y mediante este salto cuántico consiguen cubrir esa distancia mucho más deprisa que si se movieran con normalidad a través de un transistor. De ahí que estos instrumentos se empleen como interruptores muy veloces en microprocesadores.

Una idea ingeniosa en busca de un uso

Así es como los físicos consideraron el láser cuando se inventó por primera vez en 1958. Hoy en día, el láser cuenta con una gran variedad de aplicaciones, que van desde la construcción naval hasta la cirugía oftálmica, los lectores de CD o las cajas registradoras de los supermercados. Pero los principios que se esconden tras él implican algo más que la mera producción de un haz de luz intenso. La física del láser es pura mecánica cuántica. A diferencia del microchip, que en el fondo se basa en las propiedades de los electrones y su estricto cumplimiento del principio de exclusión, el láser depende de la camaradería y la cooperación que exhiben los fotones.

Cuando un electrón gana energía absorbiendo un fotón, puede saltar a una órbita atómica más alta. La diferencia de energía entre las dos órbitas será igual a la energía del fotón absorbido, que a su vez depende de su frecuencia, de acuerdo con la fórmula de Planck. El electrón excitado volverá a caer de nuevo y de forma espontánea muy poco después mediante la emisión de un fotón con la misma energía. Este proceso se denomina «emisión espontánea», y es la manera como funcionan muchas lámparas. La corriente que circula por un cable de

tungsteno (también llamado wolframio) lo calienta y hace que los electrones de los átomos de tungsteno ganen energía y se exciten a órbitas más elevadas. Cuando vuelven a descender, emiten fotones en un espectro amplio de frecuencias que incluyen las del rango de la luz visible.

Un láser funciona de un modo distinto. Si en lugar de caer a su estado original de forma espontánea, el electrón recibe un estímulo para hacerlo cuando experimente el impacto de un fotón, entonces se consiguen dos fotones de salida: el original y el nuevo que emite el electrón. A continuación, los dos fotones pueden provocar que más electrones excitados caigan a un estado de energía más bajo y liberen aún más fotones, algo así como una reacción en cadena. Este proceso se denomina «emisión estimulada», y de ahí recibe su nombre el láser: *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* («amplificación de luz mediante la emisión estimulada de radiación»).

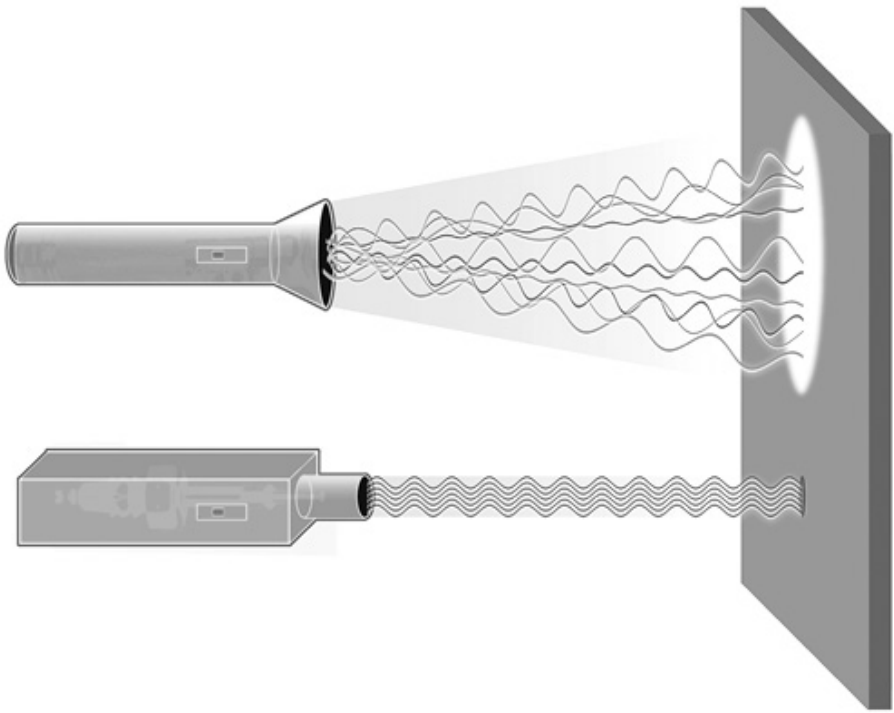
Los fotones liberados, que son bosones, salen en el mismo estado cuántico que los fotones incidentes; tienen la misma longitud de onda, están en fase y viajan en la misma dirección. Por eso se dice que la luz láser es coherente[61]. Puede tener una intensidad enorme y se puede concentrar en un haz de luz muy reducido.

El primer láser se construyó en 1960, y desde entonces se le han encontrado numerosas aplicaciones prácticas. El láser se puede diseñar para soldar, cortar y fundir. Los encontramos en las líneas de producción de automóviles y en la industria textil. Se pueden emplear para comprobar el alineamiento de zanjas muy rectas o para unir entre sí componentes grandes de la industria pesada con alta precisión. La exactitud de sus longitudes de onda se puede ajustar y utilizar en campos como la interferometría para medir distancias con una precisión excepcional. (Por ejemplo, se han usado láseres para medir la distancia que separa la Tierra de la Luna con una precisión de unos pocos centímetros). También se usan para crear hologramas: imágenes tridimensionales con gran variedad de aplicaciones que tal vez incluyan el desarrollo de dispositivos de almacenamiento de información increíblemente eficaces.

Los láseres también se pueden confeccionar con diodos semiconductores de un modo parecido a los LED. Estos láseres de estado sólido, económicos y divertidos, son robustos, fiables y del tamaño de un grano de arena. Hoy en día estos dispositivos se usan en el ámbito de las comunicaciones para enviar luz por fibras ópticas, y

se encuentran en lectores de CD y DVD, y en las cajas de los supermercados, donde sirven para escanear códigos de barras.

Dada su capacidad para concentrar fotones energéticos con una precisión tan notable, los láseres también se han vuelto cruciales en la industria informática. Se usan en un proceso llamado fotolitografía para grabar las incisiones y ranuras de los circuitos integrados en chips de silicio.



A diferencia de la luz normal de una linterna, formada por una mezcla de ondas electromagnéticas de muchas longitudes de onda diversas desparramadas en todas direcciones, la luz láser es altamente ordenada. Todas las ondas tienen la misma longitud de onda, que se corresponde con la frecuencia característica de los átomos emitidos. La luz láser también tiene una alta intensidad debido al proceso de amplificación y no se desparrama al emitirla, lo que permite lanzarla hasta distancias muy largas.

El láser por fibra óptica se convertirá pronto en el método habitual para transmitir información por todo el mundo, y es ahí donde radica el futuro de internet. Casi hemos llegado a la fase en que la televisión interactiva y el ordenador personal serán una y la misma cosa. De hecho, ya es posible descargarse películas de internet y verlas en el ordenador. Los cables de fibra que transmiten luz láser no tardarán en transportar miles de millones de bits de información, el equivalente a

las obras completas de William Shakespeare, ¡en menos de un segundo![62]

Lo más extraordinario de todo tal vez sea que los láseres se pueden usar en la actualidad para controlar átomos sueltos de maneras que están abriendo las puertas a un nuevo campo de la tecnología cuántica del que hablaremos en el último capítulo.

Imanes del tamaño de una casa

Aunque me considero un manitas bastante competente en casa, suelo ganarme las afables burlas de mis colegas experimentales por mi ineptitud en el laboratorio, al igual que la mayoría del resto de físicos teóricos de todo el mundo. Y aunque es cierto que me las arreglo para evitar por completo cualquier clase de trabajo experimental, hasta hace poco no había reparado en lo ajeno que he permanecido a la tecnología utilizada para obtener los resultados experimentales que intento desentrañar. Pero la clave de lo que me dispongo a contar aquí no es esa, sino poner de relieve otra aplicación cuántica de la que tal vez haya oído hablar usted.

Durante el año 1999 realicé una estancia de seis meses en la instalación del ciclotrón de la Universidad del Estado de Míchigan (la MSU), donde trabajé interpretando datos nuevos de sus experimentos más recientes sobre núcleos «exóticos»[63]. El Laboratorio Nacional del Ciclotrón Superconductor de la MSU es uno de los laboratorios dedicados a la investigación en física nuclear más destacados del mundo, y en él se generan y estudian especies raras y exóticas de núcleos atómicos. El término *ciclotrón* significa que esos núcleos se aceleran hasta que adquieren altas energías dentro de un potente campo magnético, antes de lanzarlos deliberadamente contra un objetivo nuclear para ver qué sucede. Los ciclotrones utilizan electroimanes muy potentes que obligan a las partículas cargadas o iones a recorrer su interior en círculos, de forma que giren en espiral hacia fuera y vayan ganando velocidad durante el proceso.

Yo sabía esto mucho antes de acudir a la MSU y, por supuesto, también conocía las bases de lo que le ocurre a los iones cargados una vez que salen del ciclotrón y penetran en el sistema de análisis de rayos mientras se dirigen a la zona donde se encuentra su objetivo. De hecho, para realizar mis investigaciones me bastaba con tener una

información bastante superficial sobre los detalles finos. No necesitaba conocer los datos brutos, ni las ingeniosas técnicas (y créame que son muchas) aplicadas para obtenerlos, sino tan solo los datos finales ya completamente procesados[64].

La instalación del acelerador se encuentra alojada dentro de un gran edificio situado en el centro del campus y alberga despachos en dos alas. Durante mi estancia, accedía al edificio por una de las diversas puertas y me dirigía al despacho donde dedicaba mi tiempo a desarrollar los modelos matemáticos de las reacciones nucleares en estudio, a escribir programas informáticos o a debatir sobre física con el resto de teóricos que andaban por allí. Por supuesto, también recorría con regularidad los pasillos para tomarme un café, charlar con los colegas de esperimentos o para asistir a seminarios.

Un día, hacia el final de mi estancia allí, me vi comentando algo con un compañero, Gregers Hansen, en su despacho. Gregers es un eminente físico nuclear oriundo de Dinamarca pero asentado en Estados Unidos. Fue uno de los descubridores del halo nuclear que describí en un recuadro del Capítulo 3. Entonces reparé en que la pantalla de su ordenador estaba parpadeando y me comentó que lo estaba «desimantando» para neutralizar campos magnéticos parásitos. Pertinentemente, el monitor de su ordenador contaba con un botón justo para ello. Le pregunté por qué era necesario hacer eso, y él me explicó que era debido a la comprobación que se estaba efectuando en el ciclotrón. Al ver mi expresión de desconcierto y comprender mi ignorancia al respecto, me aclaró que el problema se debía al campo magnético del más grande de los dos imanes superconductores que se habían puesto en funcionamiento aquel mismo día. Cuando señalé que no había llegado a verlos, se quedó pasmado. «¿Me estás diciendo que te has pasado seis meses sentado a menos de diez metros del imán ciclotrón más potente del mundo[65] sin saberlo?». Al día siguiente, el último que pasé allí, me llevó a recorrer todo el laboratorio. En efecto, al otro lado de la pared de mi despacho y separado por varios metros de aislamiento de la radiactividad, había un imán tan grande que había que subir unas escaleras adyacentes a él por la parte exterior para llegar arriba del todo. Desde entonces he pasado algún tiempo en el Laboratorio TRIUMF de Vancouver, que alberga el imán de ciclotrón más grande del mundo, aunque es menos potente que el de la MSU.

Lo interesante de todo esto es cómo funcionan esos imanes, porque

hacen uso de otro efecto puramente cuántico: la superconductividad.

Electricidad de movimiento perpetuo

Todos los conductores exhiben resistencia eléctrica porque los electrones conductores chocan de manera constante contra los átomos vibrantes del metal. Esas vibraciones aumentan a medida que el metal se calienta, lo que incrementa la resistencia. Sin duda, al enfriar un metal se reducen las vibraciones atómicas y, por tanto, la resistencia eléctrica. Pero en 1911 se descubrió un efecto muy sorprendente.

Al enfriar mercurio por debajo de 4,2 kelvins[66], su resistencia desciende de pronto a cero, y se convierte en un superconductor. Ahora se conocen muchos metales y aleaciones que muestran este comportamiento al enfriarlos por debajo de sus temperaturas críticas, por lo común unos pocos grados por encima del cero absoluto. Esto significa que cuando una corriente circula por un superconductor, nunca disminuye y no precisa ninguna fuente de tensión para mantenerse una vez que está circulando. Y aunque no podamos estar seguros de que la resistencia en un superconductor equivalga exactamente a cero, se acerca tanto a ese valor que no hay ninguna diferencia.

El origen de este efecto radica en la mecánica cuántica. Las tres personas que explicaron su funcionamiento en 1957 fueron galardonadas con el Premio Nobel: John Bardeen (que ya había recibido un premio Nobel por participar en la invención del transistor), Leon Cooper y Robert Schrieffer. A cierta temperatura, los electrones con funciones de onda similares tienden a emparejarse en lo que se conoce como «pares de Cooper», por uno de sus descubridores, debido a una fuerza de atracción muy débil. Esto tiene su origen en la forma en que el entorno circundante se ve afectado por la presencia de cada electrón. (Me saltaré aquí el resto de detalles técnicos).

Cada par de Cooper se comporta entonces como un solo bosón (dos fermiones acoplados entre sí siempre forman un bosón)[67]. Desde luego está usted perdonado si cree que los electrones de esos pares de Cooper andan por ahí unidos entre sí como gemelos siameses. Al fin y al cabo, si forman un bosón seguramente serán como una «partícula» nueva. Pero no debemos olvidar las lecciones cuánticas recién

aprendidas. No es necesario que esos dos electrones estén muy próximos entre sí. De hecho, la distancia entre cada miembro de esos pares es ¡miles de veces mayor que la distancia media entre otros dos electrones individuales cualesquiera de ese material! Decimos que el par de Cooper se encuentra en un estado entrelazado descrito a través de una sola función de onda. Si se comportan como un solo bosón es gracias a su conexión no local. Los dos electrones de un par de Cooper mantienen una comunicación continua, como adolescentes situados en distintos lugares del patio del recreo que chatean entre sí con teléfonos móviles (lo cual no es ningún efecto cuántico, pero ¡resulta igual de extraño!).

Por último, no existe ninguna resistencia eléctrica porque, para que eso ocurra, uno de los dos electrones tendría que chocar contra un átomo y salir despedido con la intensidad suficiente para deshacer el par. Por tanto, cualquier esparcimiento de este tipo debe ser lo bastante intenso como para lograrlo. A temperaturas muy bajas, la fuerza de unión entre pares de Cooper basta para soportar el débil esparcimiento inducido por los átomos. De ahí que los electrones del par simplemente no choquen con los átomos y no haya resistencia eléctrica.

Una de las principales aplicaciones de la superconductividad es, como en el caso del ciclotrón de la Universidad del Estado de Michigan, crear imanes muy potentes. (¡Esta historia es un ejemplo de cómo se ha utilizado la rareza cuántica para construir una máquina que permita seguir estudiando la rareza cuántica que reside en núcleos atómicos exóticos!). Un electroimán convencional implica el paso de corriente por una bobina de alambre para generar un campo magnético. Cuantas más vueltas tenga el alambre, más intenso será el campo. Sin embargo, esto también conlleva una resistencia mayor que debilita la corriente, y exige un voltaje mayor para compensarlo. El problema desaparece si la bobina está formada por un material superconductor. En la práctica, los electroimanes convencionales de gran tamaño portan un núcleo de hierro dentro de la bobina eléctrica, porque sin él la cantidad de corriente necesaria convertiría el imán en algo extremadamente caro. Pero con un núcleo de hierro, la intensidad del campo magnético se satura en un valor máximo, y la única manera de conseguir más «capacidad de desviación» consiste en tener un imán más grande (más hierro). Para que un imán así realice el trabajo del imán superconductor de la MSU tendría que tener las

dimensiones ¡de un edificio de viviendas de tamaño medio!

Hoy en día, los imanes superconductores tienen gran variedad de aplicaciones. Por ejemplo, se usan como separadores magnéticos en la industria de la minería y como sistemas de navegación magnética en medicina, donde permiten que los cirujanos guíen un catéter dentro del cuerpo, suministren fármacos o puedan realizar biopsias.

Igual que los fotones de un láser actúan en armonía para amplificar un efecto cuántico hasta niveles macroscópicos, también los pares de Cooper de un superconductor son capaces de cooperar como un conjunto de bosones. Se parece un poco a los grandes bancos de peces que se desplazan como una sola entidad que suelen verse en los documentales de televisión. Este comportamiento se puede aprovechar en un dispositivo llamado SQUID (acrónimo de su nombre en inglés *Superconducting QUantum Interference Device,* o «dispositivo superconductor de interferencia cuántica»). Los SQUID portan componentes llamados «uniones de Josephson», que se parecen a los diodos de efecto túnel. Pero en lugar de tener dos bandas semiconductoras, la unión de Josephson está formada por dos superconductores separados por una delgada capa aislante. Los pares de Cooper pueden atravesar esta capa con facilidad, lo que vuelve el SQUID increíblemente sensible a cambios minúsculos de campos magnéticos. Este dispositivo encuentra una de sus aplicaciones en el ámbito de la medicina, donde permite estudiar la actividad del cerebro mediante la monitorización de los campos magnéticos producidos por pequeñas corrientes eléctricas asociadas a neuronas individuales.

Por último, una de las áreas de investigación física más activas durante los últimos quince años la ha representado el campo de la superconductividad a alta temperatura. Está muy bien contar con un material superconductor, pero hay que mantenerlo a temperaturas tan bajas, a menudo recurriendo a helio líquido[68], que supone un inconveniente para darle más usos prácticos. En 1986 se descubrieron ciertas cerámicas que son superconductoras hasta temperaturas superiores a 100 K (¡aunque ese valor sigue estando 173 °C por debajo del punto de congelación del agua!). La investigación actual en este campo se centra en tres cuestiones: si hay materiales que actúen como superconductores a temperatura ambiente, si alguno de esos materiales es un metal maleable, puesto que la cerámica es frágil y quebradiza y no es adecuada para estirarla y darle forma de cables

conductores de la electricidad, y, por último, qué es lo que hace que estos materiales se comporten de ese modo a temperaturas tan (relativamente) altas.

Si algún día conseguimos fabricar cables eléctricos a partir de superconductores a temperatura ambiente, podría ayudarnos a tener un suministro eléctrico más barato. La eficiencia energética de la electricidad actual es baja debido en parte a la energía que se disipa en forma de calor en los cables de transmisión que recorren los países. Con cables superconductores podría transmitirse la corriente con una eficacia hasta cinco veces mayor, y eso permitiría una reducción drástica del empleo de combustibles fósiles contaminantes.

Energía procedente de los núcleos

Como me he desviado al tema de las necesidades energéticas, este es un buen momento para describir otra aplicación de la mecánica cuántica. La energía nuclear produce en la actualidad la sexta parte de la electricidad mundial (y asciende casi a dos tercios en Francia). La idea básica que subyace a la energía nuclear es la reacción de fisión, donde núcleos pesados absorben neutrones, lo que los escinde en dos trozos y libera energía. Durante ese proceso generan más neutrones, que son absorbidos por núcleos vecinos que también se escinden, lo que mantiene una reacción en cadena. El calor producido en esas reacciones se usa para convertir agua en vapor que propulsa turbinas y genera electricidad.

Un método más limpio para extraer la energía inmersa en el interior de núcleos atómicos consiste en recurrir al proceso inverso. En las reacciones de fusión, se fuerza la unión de dos núcleos ligeros para crear un núcleo mayor y más estable. Esto va acompañado de la liberación de una cantidad inmensa de energía que se puede aprovechar. Esa energía de «fusión termonuclear» constituye la fuente del calor y la luz procedentes del Sol, y es el motivo de que todas las estrellas brillen.

A partir de dos núcleos de hidrógeno (formados por un solo protón), una secuencia de pasos acaba formando un núcleo de helio (dos protones y dos neutrones: una partícula alfa). El problema es que los protones se repelen entre sí a menos que algo los obligue a juntarse mucho (en realidad se produce un túnel a través de la barrera

energética entre ambos). Para que esto ocurra se requieren unas condiciones muy extremas de altas temperaturas y densidad; en el interior del Sol no hay ningún problema para encontrarlas, pero son bastante difíciles de mantener en un laboratorio de la Tierra.

Un detalle interesante que debemos señalar aquí es que el primer paso del proceso de fusión dentro del Sol precisa la intervención combinada de las cuatro fuerzas de la naturaleza. La fuerza gravitatoria de atracción que se da entre toda la materia garantiza que el hidrógeno se apriete lo bastante como para que dos protones tengan buenas posibilidades de fusionarse, con lo que la fuerza nuclear fuerte de atracción vence a la fuerza electromagnética de repulsión para forzarlos a unirse todavía más. Pero como dos protones no se unen entre sí de manera permanente, mientras que un protón y un neutrón sí, uno de los protones se ve forzado a experimentar una desintegración beta y transformarse en un neutrón, y ahí es donde entra en juego la fuerza nuclear débil. Una vez que ocurre esto, nos encontramos con la unión de un protón y un neutrón.

Un núcleo formado por un solo protón y un neutrón recibe el nombre de «deuterón», porque es un núcleo del isótopo pesado del hidrógeno, llamado deuterio. El deuterón ha sido relevante en el desarrollo de la física nuclear. Es el núcleo compuesto más simple (cualquier cosa más pequeña tendría un solo protón o neutrón) y por eso ofrece un banco de pruebas para estudiar las propiedades de la fuerza nuclear que mantiene unidos los nucleones dentro de los núcleos. Asimismo representa una sonda muy útil que podemos hacer reaccionar con otros núcleos para estudiar sus propiedades. Yo tuve la suerte de tener como director de tesis a Ron Johnson, uno de los mayores expertos mundiales en la estructura y propiedades de reacción del deuterón, y conocido por sus alumnos irremediablemente como «Deuterón Johnson».

Una vez que se forman deuterones en el Sol, pueden fusionarse con más protones para formar núcleos de helio. Para ello es necesario que los deuterones y protones atraviesen por efecto túnel sus barreras de Coulomb mutuas.

Muchos países están investigando en el campo de la fusión, la cual implica el estudio del deuterio y el tritio (un isótopo aún más pesado del hidrógeno cuyos núcleos se componen de un solo protón y dos neutrones). En la actualidad se acaba de superar el umbral de «rentabilidad», en el que la cantidad de energía que se produce como

resultado del proceso de fusión es mayor que la energía suministrada para crear las condiciones de partida necesarias para forzar la fusión de los núcleos. El siguiente paso consiste en descubrir cómo mantener las condiciones de fusión durante más que ¡una mera fracción de segundo!

No es solo que el combustible necesario para propulsar los reactores de fusión (agua) existe en cantidades ilimitadas, sino también que la energía que produce la fusión genera residuos mucho menos perjudiciales que la fisión nuclear. Esta es la razón por la que la mayoría de los países ricos del planeta han invertido, y siguen invirtiendo, tanto en este campo de estudio, a pesar de la lentitud con que se avanza.

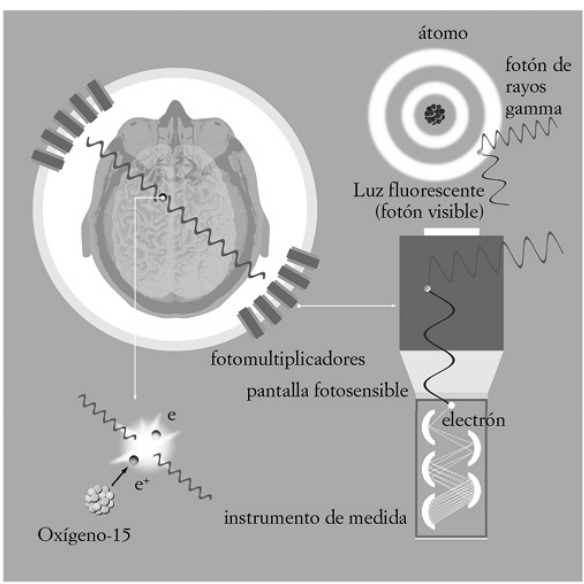
La mecánica cuántica en la medicina

En la actualidad hay tantas aplicaciones de la mecánica cuántica en la medicina que no puedo enumerarlas todas aquí, desde los rayos X hasta la cirugía láser. Así que me limitaré a comentar brevemente tan solo dos. Una de ellas utiliza el espín cuántico de los núcleos, mientras que la otra guarda relación con el empleo de antimateria para cartografiar el cerebro.

Físicos estadounidenses desarrollaron los principios de la técnica de la resonancia magnética nuclear hace medio siglo, y durante muchos años se han empleado como herramienta espectroscópica en el campo de la química. La idea consiste en medir las concentraciones de distintos átomos en materiales a partir de la radiación que emiten sus núcleos atómicos a medida que su espín cuántico se invierte en un campo magnético. Muchos núcleos rotan (de manera cuántica) debido al espín combinado de los protones y neutrones que los conforman). El eje sobre el cual gira (dicho de manera informal) un núcleo se alineará, como la aguja de una brújula, con las líneas de un campo magnético generado desde el exterior. Dependiendo de la dirección del espín se puede determinar si ese eje apunta en una dirección u otra a lo largo de las líneas de campo magnético. Esas direcciones se denominan sencillamente «espín arriba» o «espín abajo». Algunos de los núcleos se ven forzados entonces a invertir el eje del espín debido a la aplicación de una señal de alta frecuencia procedente de un campo magnético oscilante. Cuando recuperan la orientación original

liberan un pequeño estallido de energía específico de ese tipo de núcleo.

La mayoría de los materiales, como la materia orgánica que conforma nuestro cuerpo, se componen de moléculas, que a su vez contienen distintas clases de átomos. Usando una técnica llamada «construcción de proyección», las señales de resonancia magnética nuclear procedentes del cambio continuo del espín de ciertos átomos se pueden usar para crear imágenes del interior del cuerpo humano. Se trata de un método bastante inocuo porque, a diferencia de la tomografía de rayos X, no hay que introducir radiación ionizante perjudicial en el cuerpo. A pesar de ello, la máquina utilizada para este fin se suele conocer como escáner de IRM (Imágenes por Resonacia Magnética), por el temor que infunde en general el término *nuclear* dentro de la expresión «resonancia magnética nuclear».



Funcionamiento de un escáner PET: Los átomos de un isótopo inestable se usan para detectar moléculas de glucosa en el cerebro. Los núcleos de esos átomos experimentan una desintegración beta con la emisión de un positrón (el equivalente en antimateria del electrón). Este choca enseguida con un electrón atómico y lo aniquila, lo que libera dos fotones de rayos gamma en sentidos opuestos. Un escáner PET consiste en series de detectores de fotones que captan los rayos gamma en cristales de centelleo. Un solo rayo gamma de alta energía excita muchos átomos en esos cristales, pero enseguida vuelven a asentarse mediante la liberación de fotones de menos energía. Estos, a su vez, desencadenan una cascada de electrones dentro de un tubo fotomultiplicador, que acaban produciendo un pulso eléctrico. Estas señales se usan para crear un mapa del cerebro, capa a capa, dependiendo de dónde se encuentren las mayores concentraciones de glucosa. Aunque tal vez suene bastante alarmante que se pueda ver el interior del cerebro humano usando átomos radiactivos que escupen antimateria, los escáneres PET son en realidad mucho menos perjudiciales que los rayos X.

La tomografía por emisión de positrones (o PET, por sus siglas en inglés: *Positron Emission Tomography)* es una técnica fantástica bastante fácil de explicar. Un uso específico del escáner PET, por ejemplo, consiste en tomar imágenes del cerebro cuando un paciente ha sufrido un derrame cerebral o cuando un recién nacido ha corrido el riesgo de sufrir falta de oxígeno durante el parto. Primero se inyecta en el cuerpo del paciente glucosa con isótopos radiactivos inocuos de carbono o nitrógeno, desde donde se transporta al cerebro. Entonces se podrán tomar imágenes de las regiones con una actividad neuronal alta y baja midiendo la concentración de glucosa, que es la fuente de energía del cerebro, en las distintas regiones.

Los isótopos radiactivos de la glucosa experimentan una desintegración beta y emiten positrones. Estas partículas se topan casi de inmediato con electrones y tiene lugar un proceso de aniquilación de pares en el que el electrón y el positrón desaparecen en un destello de luz con la emisión de dos fotones energéticos en sentidos opuestos. Detectores llamados fotomultiplicadores captan esos fotones y permiten trazar hacia atrás su trayectoria para llegar al punto exacto del cerebro en el que se produjo la aniquilación electrón/positrón. De este modo se localiza el núcleo radiactivo desintegrado y, por tanto, la glucosa que lo portaba. La detección de gran cantidad de estos pares de fotones durante cierto espacio de tiempo permite crear una serie de imágenes que revelan los cambios en la concentración de glucosa.

Mecánica cuántica y mutaciones genéticas

Hace unos años, mi compañero microbiólogo Johnjoe Mac- Fadden y yo publicamos un artículo especulativo en la revista estadounidense Biosystems *en el que propusimos el origen cuántico de un tipo inusual de mutación genética, conocida como mutación adaptativa, de la bacteria E.* coli. *Era especulativo por dos razones. En primer lugar, el proceso de las mutaciones adaptativas despertaba, y todavía lo hace, cierta controversia. En segundo lugar, el mecanismo cuántico que proponíamos requería cierta propiedad cuántica exclusiva de las células vivas, porque de otro modo nuestra teoría no se sostenía.*

Ahora se sabe que las propiedades de codificación genética con que cuentan las moléculas de ADN de todas las células vivas se deben a la naturaleza de los enlaces de hidrógeno entre pares de bases. Desde que Francis Crick y James Watson descubrieron la estructura de doble hélice del ADN, se ha sabido que ciertas mutaciones naturales pueden ocurrir con el paso aleatorio de protones de un lugar del ADN a otro cercano por efecto túnel, donde forman un enlace químico diferente. Esta clase de errores accidentales en la codificación del ADN se dará en uno de cada mil millones de casos, pero cuando ocurre tenemos una mutación cuántica. Así que la mecánica cuántica tiene cierto peso en la evolución, en realidad.

En las mutaciones adaptativas, no se ha encontrado ninguna explicación así de simple. Cuando se suministra lactosa a una cepa de células de *E. coli* llamada *lac–,* que es deficiente en una enzima que les permite metabolizar la lactosa, contamos con que la mayoría muera. Sin embargo, algunas mutarán de manera aleatoria a la cepa *lac+,* capaz de alimentarse de lactosa y crecer y, por tanto, empezar a replicarse. En cambio lo que se encontró fue que en presencia de lactosa mutan muchas más *lac–* de *E. coli* a *lac+* que cuando no hay lactosa,

aunque no puedan saber que la lactosa está presente hasta después de mutar. Parece cosa de magia.

Aquí es donde la idea de la superposición cuántica podría ofrecer una explicación. Veamos, en cada célula la mutación de *lac*– a *lac*+ puede deberse al traslado por el efecto de túnel de un solo protón entre dos lugares adyacentes. Por supuesto, desde un punto de vista cuántico, la función de onda del protón es tal que tiene cierta probabilidad de encontrarse en cualquiera de esos dos lugares: una superposición de efecto túnel y no efecto túnel. Y, dado que esa coherencia cuántica puede durar dentro de la célula el tiempo suficiente, todo el ADN debería evolucionar como una superposición de estados mutados y no mutados.

El problema, desde luego, es la decoherencia, la filtración de la rareza cuántica al entorno circundante. Esto debería ocurrir a una escala temporal inferior a una milmillonésima de segundo, demasiado deprisa para que el interior de la célula experimente los cambios necesarios para que ella (o una parte de su función de onda) mute a la cepa que tiene en cuenta la lactosa del entorno y puede utilizarla. No obstante, nosotros queríamos que la superposición durara lo bastante como para que la propia lactosa causara la decoherencia. Es decir, la lactosa realiza el trabajo de abrir la caja que mantiene encerrado al gato de Schrödinger y colapsa el estado de la célula en uno u otro sentido. Esto se debe a que, dada la cepa correcta de *E. coli,* las reacciones químicas se producen involucrando a la lactosa, lo que también puede deparar la decoherencia. Si la decoherencia se produce más deprisa en presencia de lactosa que en ausencia de ella, entonces podrían explicarse los sorprendentes resultados observados en los experimentos de mutación adaptativa.

Esto podría suceder mediante un mecanismo sencillo por el cual la repetición de mediciones «arrastra» un sistema cuántico de un estado a otro. Si la lactosa «mide» una célula que va a pasar al estado mutado *lac*+*,* que sería raro, entonces la célula progresará, se alimentará y crecerá. Pero si la célula está en el estado *lac*–*,* entonces no pasa nada y vuelve a situarse en una superposición de dos estados. Por tanto, cuanto más frecuente sea la medición, más regular será la cosecha de mutaciones *lac*+.

Por desgracia, cuesta creer que la coherencia cuántica dure tanto en un entorno tan ajetreado y complejo como es una célula viva. La única posibilidad sería que una célula se comportara de un modo muy distinto a un sistema inanimado de un tamaño, complejidad y temperatura equivalentes. De hecho, Erwin Schrödinger ya propuso en su famosa obra de 1944 titulada *¿Qué es la vida?*[69] que las células vivas mantienen una estructura y un orden equivalentes a los de la materia normal cerca del cero absoluto, un régimen donde los efectos cuánticos persisten durante mucho más tiempo. Pero como nadie sabe en realidad qué es lo que torna la vida en algo tan especial, nuestra teoría sigue siendo una especulación.

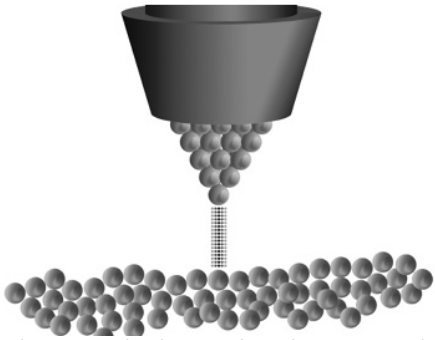
Desde la publicación de nuestro artículo he dejado la idea algo de lado, pero el físico Paul Davies, uno de los pocos que alabó nuestro planteamiento, también se muestra interesado en estas cuestiones. Como él señala, aún nos falta entender bien la naturaleza de la decoherencia, por no hablar de las complejas propiedades cuánticas de las células vivas, y aún queda mucho trabajo por hacer.

Microscopios para ver átomos

A comienzos de la década de 1930 ya se había alcanzado el límite de los microscopios ópticos (los que funcionan concentrando la luz procedente de la muestra a través de lentes). La longitud de onda de la luz visible limitaba la ampliación máxima a unos 1000 aumentos (y la resolución de detalles a fracciones de una micra). El deseo de acceder a detalles más finos que eso en las células vivas animó a los científicos a estudiar el empleo de ondas de longitudes mucho más cortas, y para ello ser reveló útil la naturaleza ondulatoria de los electrones. Las ondas de materia asociadas a haces de electrones tienen longitudes de onda mucho más cortas que las de la luz visible. El primer microscopio electrónico se desarrolló en Alemania en 1931, y empleó un haz concentrado de electrones para estudiar la estructura y composición de una muestra. Estos microscopios electrónicos de transmisión (o MET) funcionan basándose en el mismo principio que un proyector de diapositivas, ya que la parte del haz que se transmite a través de la muestra se proyecta sobre una pantalla.

Después de la Segunda Guerra Mundial se desarrolló un nuevo tipo de microscopio electrónico conocido como «microscopio electrónico de barrido» (o SEM, del inglés *Scanning Electron Microscope),* que consiste en escanear un haz de electrones sobre la superficie de la muestra. La imagen de la superficie en cuestión se forma mediante la recolección y amplificación de los electrones que rebotan o salen despedidos de la muestra.

Hoy en día la microscopia se ha desarrollado hasta tal punto que la resolución y los detalles alcanzan el nivel de átomos individuales. El microscopio de efecto túnel (o STM, del inglés *Scanning Tunnelling Microscope),* desarrollado por primera vez a comienzos de la década de 1980, implica arrastrar una aguja fina de metal conductor sobre la superficie de la muestra. Los electrones pasan por efecto túnel a través del hueco entre la aguja y la superficie, y la corriente eléctrica producida de este modo se puede medir y asociar al tamaño del hueco y, con ello, la ubicación de los átomos en la superficie de la muestra.



La punta de un STM lee la superficie de un material permitiendo que los electrones atraviesen el hueco por efecto túnel, lo que produce una corriente eléctrica que proporciona una medida de los contornos de la superficie. Puede usarse incluso para desplazar átomos por la superficie de una forma controlada.

El inconveniente principal del STM es que la muestra también tiene que ser muy buena conductora de la electricidad, y que hay que prepararla de un modo específico. En 1989 se puso a la venta el primer microscopio comercial de fuerza atómica (o AFM, *Atomic Force Microscope)*. Aunque seguía usando una técnica de escaneo similar con una punta afilada para examinar y cartografiar la superficie, estos microscopios eliminaban los electrones de efecto túnel y usaban en su lugar un microrresorte muy sensible que empujaba la punta con mucha suavidad hacia la superficie. La fuerza utilizada para mantener la aguja en su sitio a medida que avanza a saltos por la superficie es del orden de las fuerzas interatómicas (alrededor de 10^{-9} newton), de ahí su nombre.

Hoy en día el uso de la microscopia de sonda de barrido, que emplea microscopios tanto STM como AFM, no se limita a la mera representación gráfica de superficies. En física y química se puede usar la sonda para desplazar moléculas, y hasta átomos individuales, de forma controlada. En la actualidad se están desarrollando y aplicando técnicas nuevas a campos que van desde la biología hasta los semiconductores, el almacenamiento de datos o el análisis de estructuras atómicas en polímeros y cristales. En el futuro, las puntas de los STM podrán emplearse incluso para confeccionar todo un conjunto de máquinas moleculares diminutas, el santo grial del emergente campo de la nanotecnología.

Ingeniería atómica y nanotecnología

Tal como indica su nombre, la nanotecnología es la disciplina relativamente novedosa dedicada a confeccionar y utilizar micromáquinas de un tamaño nanométrico (un nanómetro equivale a 10^{-9} metros o millonésimas de un milímetro). Es la escala de los átomos y las moléculas, y cae de lleno dentro del ámbito de la cuántica. Muchos físicos creen ahora que no hay ninguna razón que impida crear robots moleculares, componentes de circuitos, piezas, palancas y engranajes así de diminutos. Para que se haga una idea de las dimensiones de estas entidades, comparadas con una hormiga serían lo que una hormiga frente a un estadio de fútbol. Los científicos ya han demostrado que son

capaces de manipular átomos y moléculas individuales de manera controlada, y muchos creen que no falta mucho para la creación de esos robots de dimensiones nanométricas. Se afirma que la nanotecnología está lista para desencadenar una revolución industrial que nos transformará la vida aún más que la microelectrónica del silicio en el siglo pasado.

Un posible avance del futuro sería que robots moleculares de ese tipo consiguieran replicarse (no mediante un proceso biológico, sino mediante la simple creación de copias de sí mismos) por billones a partir del material que les proporcionara el entorno. De este modo, verdaderos ejércitos de máquinas podrían utilizarse para llevar a cabo una cantidad abrumadora de tareas, desde matar células cancerígenas (¡una a una!) hasta milagrosas proezas de ingeniería, o incluso la creación de lo que se ha dado en llamar «materiales inteligentes» (en inglés, *smart materials)*.

Aunque aún faltan décadas para alcanzar esta tecnología, ya se han dado los primeros pasos. A comienzos de la década de 1990, expertos japoneses estuvieron estudiando hollín (producido en una descarga eléctrica entre dos electrodos de carbono) a través de un microscopio electrónico de transmisión. Descubrieron diminutos tubos moleculares de carbono que desde entonces han revelado tener unas propiedades increíbles. Esos nanotubos de carbono no son más que láminas sueltas de grafito enrolladas (conocidas como «grafeno») de un átomo de grosor. Dadas las propiedades de los enlaces de carbono, esos nanotubos podrían emplearse como la fibra de alta resistencia definitiva cuyas aplicaciones podrían abarcar desde puntas para microscopios de sonda de barrido, hasta edificios a prueba de terremotos. Coches fabricados con nanotubos de carbono recuperarían su forma original después de un impacto.

Los nanotubos pueden funcionar asimismo como cables moleculares pensados para ser conductores fantásticos de la electricidad (casi tan eficientes como los superconductores) o semiconductores para usarse en circuitos integrados. Hasta podrían emplearse para cambiar de lugar átomos y moléculas sueltos con eficiencia.

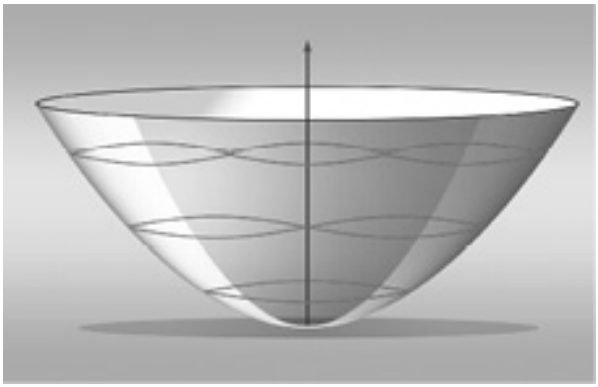
No los pierda de vista.

Condensados de Bose-Einstein

Ed Hinds, profesor de Física en la Universidad de Sussex

Imagine un solo átomo atrapado en un cuenco sumamente pequeño. Una función de onda cuántica describe el movimiento del átomo dentro de la trampa. La función de onda experimenta distinta cantidad de vibraciones en distintos lugares, y el cuadrado de la amplitud de vibración determina la probabilidad de encontrar el átomo allí. Si suponemos que el átomo no puede atravesar la pared del cuenco, entonces la función de onda tiene que valer cero ahí.

La figura muestra las tres posibilidades más simples: las funciones de onda con 1, 2 y 3 zonas de vibración máxima. Cuanto menor es la distancia entre ceros de la función de onda, mayor es la energía del átomo, de modo que esas tres posibilidades de onda se corresponden con las tres energías posibles más bajas de un átomo encerrado en el cuenco. Los diversos estados energéticos se etiquetan mediante un índice $n = 1, 2, 3$, etc., que se conoce como número cuántico. Si se introduce en el cuenco una nube de muchos átomos, cualquiera de ellos será zarandeado y pasará su tiempo en una superposición de muchos estados cuánticos distintos. A mayor temperatura, mayor es el rango de estados cuánticos muestreados. El estado fundamental rara vez se ocupa en condiciones normales, porque hay muchos otros estados posibles.



Pero si el gas se torna lo bastante frío y la densidad de átomos es lo bastante elevada, puede suceder que el estado fundamental empiece a estar ocupado por dos átomos a la vez. Si los átomos son de la clase adecuada (bosones), el resultado es bastante espectacular. Las funciones de onda que describen los dos átomos se suman y crean otra con el doble de la amplitud de vibración, lo que cuadruplica la probabilidad de encontrar un átomo ahí (dicho de otro modo, hay más átomos atraídos hacia ese estado). Cuantos más átomos entran en el estado fundamental, más crece la amplitud de la función de onda y más atractivo se vuelve ese estado para otros átomos que andan zarandeados por el gas. Este es un efecto de interferencia debido a la suma constructiva de las ondas que describen cada átomo. El resultado es una avalancha en la que casi todos los átomos coinciden en ocupar el estado energético más bajo, mientras que un pequeño número de ellos se queda con el resto de la energía que hay en el gas. Estos suelen ser tan energéticos que escapan del cuenco en su totalidad, y dejan casi cada uno de los átomos restantes en el estado fundamental. Este proceso se denomina condensación de Bose-Einstein, y el conjunto de átomos en el mismo estado cuántico es un condensado de Bose-Einstein o BEC (del inglés *Bose-Einstein condensate)*[70].

Un condensado de Bose-Einstein tiene propiedades extraordinarias debido al hecho de que todas las partículas se comportan de forma idéntica. En el helio líquido, alrededor de un 10% de los átomos forman un BEC, pero esa parte del líquido fluye sin ninguna viscosidad, lo que lo convierte en un superfluido. La luz de un láser es un BEC de fotones (los fotones son bosones), lo que significa que los fotones del rayo láser tienen un comportamiento idéntico (de ahí su pureza de color y la direccionalidad del rayo). La condensación Bose-Einstein de vapor atómico fue observada por primera vez en 1995 dentro de nubes de rubidio por Eric Cornell y Carl Wieman en el JILA, y en nubes de sodio por Wolfgang Ketterle en el MIT. Igual que un rayo láser, los átomos liberados desde un BEC de vapor atómico pueden crear un rayo con una energía, una dirección y una fase de oscilación extremadamente bien definidas. Esta clase de rayo se conoce como láser atómico.

Mecánica cuántica y biología

Johnjoe McFadden, profesor de Microbiología, Universidad de Surrey

Han pasado más de cincuenta años desde que Erwin Schrödinger lanzara la asombrosa propuesta de que la vida se basa en principios cuánticos. Pero la mayoría de sus razonamientos siguen siendo hoy válidos. Schrödinger señaló que todas las leyes clásicas son estadísticas, útiles para conjuntos de miles de millones de átomos o moléculas, pero inútiles al nivel de las partículas individuales. La vida, decía él, se basa en la dinámica de partículas individuales y, por tanto, está sujeta a leyes cuánticas.

Aquello constituía una anticipación impresionante en 1944, cuando el interior de la célula se consideraba en términos generales como una especie de gelatina amorfa llamada protoplasma. Pero a medida que los biólogos moleculares han ido profundizando cada vez más en el funcionamiento de las células, han descubierto estructura a todos los niveles. La doble hélice del ADN solo mide dos nanómetros (millonésimas de milímetro) de ancho (un valor no muy superior a la escala atómica) y, al igual que las proteínas y otros componentes

celulares, presenta estructura a menos de una décima parte de su tamaño. La dinámica dentro de estas biomoléculas depende por completo del movimiento de partículas individuales. Pensemos en el motor rotativo enzimático, la F1-ATPasa, que forma el ATP (el combustible químico de la célula). Este minúsculo instrumento biológico solo mide diez nanómetros de ancho. La enzima se encuentra en la membrana celular, donde su rotación está motivada por el flujo de protones a través de un poro central. Pero es un misterio cómo se convierte el movimiento rotativo en energía química a estas escalas. Es indudable que interviene la dinámica cuántica.

Se cree que el efecto túnel guarda relación con gran cantidad de procesos bioquímicos que incluyen la fotosíntesis, la respiración, la mutación y el plegamiento de proteínas. Por ejemplo, se cree que las enzimas que determinan el gradiente de protones que impulsa la F1-ATPasa recurren al efecto túnel para conectar el proceso de transporte de protones con las proteínas de la cadena respiratoria. De hecho, muchos expertos consideran que el efecto túnel tanto en electrones como en protones es el ingrediente que falta para esclarecer la capacidad de las enzimas para acelerar de forma masiva las reacciones químicas. El efecto túnel también podría intervenir en el plegamiento de proteínas, el proceso mediante el cual una molécula de proteína busca entre miles de millones de estructuras posibles para encontrar su forma activa. Y el túnel cuántico podría ser fundamental para la evolución de la vida en la Tierra. Watson y Crick fueron los primeros en plantear que la tautomerización de las bases del ADN (un eufemismo químico para hablar de protones con efecto túnel) dentro de la doble hélice es la responsable de las mutaciones. Yo mismo he ahondado en este mecanismo junto con Jim Al-Khalili para proponer que la coherencia cuántica podría tener relevancia en ciertos tipos de mutación.

La célula viva es nanotecnología natural. De igual manera que los ingenieros y físicos que trabajan a una escala nanométrica tienen que introducir y sacar partido de la mecánica cuántica en sus modelos, la evolución a lo largo de tres mil millones de años tiene que haber incorporado la dinámica cuántica. Es probable que la mecánica cuántica sea tan fundamental para la vida como lo es el agua. De hecho, experimentos y simulaciones recientes indican que los protones implicados en los enlaces de hidrógeno en el agua están muy deslocalizados (es decir, en una superposición de dos emplazamientos separados). Los enlaces de hidrógeno tal vez constituyan la interacción bioquímica más esencial de todas, implicada en el emparejamiento de bases en el ADN, la catálisis de enzimas, el plegamiento de proteínas, la respiración y la fotosíntesis. Si la deslocalización cuántica ocupara el centro de este fenómeno, entonces sería crucial para la vida. De hecho, varios investigadores (entre ellos Paul Davies y yo mismo) han planteado que la mecánica cuántica podría ser la responsable del mayor misterio biológico: el mismísimo origen de la vida.

60. Solo es positivo en el sentido de que pierde un electrón, de modo que es positivo en relación con los electrones circundantes.

61. En oposición a la luz que sale de una bombilla convencional, que emite luz incoherente puesto que las ondas salientes no están en fase ni tan siquiera en la misma frecuencia.

62. Para darse un asombroso paseo por el futuro de la microelectrónica y las telecomunicaciones, por no hablar de áreas científicas que revolucionarán el siglo XXI, recomiendo la obra de Michio Kaku titulada *Visiones* (Madrid, Debate, 1998; trad. castellana de Fabián Chueca).

63. En este contexto, un núcleo exótico es aquel que tiene un desequilibrio enorme entre el número de protones y de neutrones que contiene. Eso no solo lo vuelve muy inestable, sino que a menudo le confiere extrañas propiedades nuevas.

64. No me siento orgulloso de esta actitud, y desde entonces he procurado poner un poco más de empeño en entender los detalles experimentales.

65. El más grande de los dos ciclotrones, el K1200, acelera núcleos atómicos hasta un tercio de la velocidad de la luz (100 000 kilómetros por segundo). Cada núcleo cubrirá una distancia de unos tres kilómetros tras viajar en círculo unas 800 veces. El campo magnético que perciben los núcleos a la salida puede ser de cinco teslas. Para dar toda la información, la intensidad del campo magnético de la Tierra asciende a una diezmilésima de tesla, y un imán normal tiene alrededor de la décima parte de un tesla en los polos. Teniendo en cuenta lo pequeño y ligero que es un solo núcleo atómico, se comprende que un campo magnético de varios teslas puede tener unos efectos espectaculares en él. Téngase en cuenta que los campos magnéticos más intensos, de hasta 60 teslas, se generan usando imanes «pulsantes» especiales.

66. El cero absoluto de temperatura se corresponde con 273 °C por debajo del punto de congelación del agua (–273 °C). Esa temperatura corresponde a 0 K, por lo que podemos decir que el agua se congela a 273 kelvins. Es imposible alcanzar el cero absoluto, pero sí podemos acercarnos hasta una pequeña fracción de 1 kelvin.

67. Esto guarda relación con el espín de los fermiones, que siempre es un múltiplo impar de medio entero, como 1/2, 3/2 , etc. Si dos electrones de espín 1/2 giran del mismo modo, se combinarán para crear un espín total de 1, y si giran en direcciones opuestas, tendrán un espín total de 0. En cualquiera de los dos casos, un sistema cuántico con un espín combinado de un número entero (0 o 1) exhibirá un comportamiento bosónico.

68. El helio existe en estado líquido por debajo de 4 K (–269 °C).

69 1. Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Barcelona, Tusquets, 2008; trad. castellana de Ricardo Guerrero). *(N. de la T.)*

70 1. Algunos átomos se comportan como bosones, otros, como fermiones. Todo depende del momento angular total que tengan. Cuando dos fermiones intentan ocupar el mismo estado, sus funciones de onda se interfieren de manera destructiva y no producen ninguna vibración en absoluto, de modo que dos fermiones nunca pueden estar juntos en el mismo estado.

10. Hacia el nuevo milenio

Hemos visto qué papel ha desempeñado y qué impacto ha tenido la mecánica cuántica en tantas áreas de la física y la química, así como su papel esencial en muchos de los avances tecnológicos del último siglo, como el láser, el semiconductor y el reactor nuclear. Así que, en este capítulo final, ha llegado el momento de retomar algunas de las ideas básicas para ver qué relevancia podrá tener en la tecnología del siglo xxi.

Experimentos ingeniosos

Me pregunto qué habría hecho Niels Bohr con algunos de los increíbles avances experimentales logrados en los ámbitos de la física atómica y la óptica cuántica a lo largo de los últimos diez años. Los primeros precursores cuánticos insistieron en que la mecánica cuántica solo debía aplicarse a un gran número (conjunto) de sistemas cuánticos idénticos para que sus predicciones tuvieran sentido. También insistieron en que debía existir una separación clara entre el mundo microscópico, donde rigen las reglas cuánticas, y el mundo macroscópico de los instrumentos de medida, cuyo comportamiento obedece a la física clásica.

Ambas restricciones se han levantado ahora que se realizan experimentos con átomos y fotones individuales.

Aquí es donde láseres de una precisión increíble han encontrado otro uso: como herramienta para manipular átomos sueltos. Una vez que se atrapan átomos en un vacío ultraalto usando campos electromagnéticos, se pueden usar láseres ajustados y orientados con precisión para enfriarlos. Debo señalar que la noción de la «temperatura» de un átomo alude sencillamente a que vibra; cuanto más se agita un átomo, más temperatura tiene. La luz láser resta energía al átomo y lo «enfría». Los láseres se pueden usar hoy en día de manera rutinaria para enfriar átomos hasta temperaturas inferiores a una milésima de un grado sobre el cero absoluto. Entonces pueden funcionar como pinzas ópticas para mantenerlos fijos en un lugar, y por último imprimirles golpes precisos de energía que los sitúen en superposiciones cuánticas y estados entrelazados.

Lo extraordinario es que estas técnicas solo se han aplicado con éxito en la última década del siglo pasado, y en los últimos años las páginas de *Nature* se han llenado de artículos que informan de sus logros. Al fin somos capaces de analizar la frontera entre el mundo cuántico y el clásico.

Por poner un ejemplo de lo rápido que cambian las ideas, a los estudiantes de física se les ha enseñado durante mucho tiempo que para «ver» un objeto, este no puede ser menor que la longitud de onda de la luz incidente sobre él. Esto es lo que provocó la invención del microscopio electrónico descrito en el recuadro del capítulo anterior. La luz visible tiene una longitud de onda aproximada de media micra (una milésima de milímetro), mientras que los átomos son mil veces más pequeños aún. Así que habrá que reescribir los libros de texto ahora que los investigadores son capaces de atrapar, observar, seguir y, en general, trastear de manera casi rutinaria con átomos sueltos usando rayos láser de luz visible.

Antes de pasar a describir cómo podrán utilizarse en el futuro estas técnicas para confeccionar un instrumento llamado computadora cuántica, echemos una ojeada a algunos de dichos experimentos. ¿Cómo puede la luz visible permitirnos ver algo tan pequeño como un átomo? Es indudable que su longitud de onda es demasiado larga.

Seguir el rastro de un átomo

Ahora podemos detectar una muestra de unos pocos miles de átomos iluminándola, pero no de la manera que tal vez esté usted pensando, a partir del mero reflejo de la luz en la muestra, tal como podría hacerse usando un microscopio. Si la frecuencia de la luz se ajusta de manera que la energía de sus fotones se corresponda exactamente, mediante la fórmula de Planck, con la energía de una transición atómica, entonces algunos de los fotones serán absorbidos por los átomos. Recordemos que una transición no es más que el salto de un electrón del átomo a un nivel de energía más alto. Así que con luz de esta frecuencia de «resonancia», se observa una disminución en la cantidad total de fotones debida a que varios miles de audaces fotones se sacrifican en los átomos. Así es como sabemos que los átomos están ahí.

Una idea relacionada con esto y muy ingeniosa permite detectar un solo átomo. En lugar de usar luz láser ajustada a la frecuencia de

resonancia, recurrimos a lo que le ocurre a la luz que no está en la frecuencia adecuada para ser absorbida. Primero se atrapan y enfrían átomos sueltos, después se inyectan uno a uno dentro de un dispositivo diminuto llamado «cavidad óptica», de una fracción de milímetro de largo y con paredes altamente reflectantes. La luz de un láser muy débil se dirige hacia el interior de la cavidad de forma que, al igual que con el átomo, haya en promedio ¡un solo fotón pululando dentro de ella en cada momento determinado! Cada vez que el fotón se topa con el átomo, se frena ligeramente porque viaja «a través» del átomo[71] (de la misma manera que la luz se frena a pasar a través de agua o de un cristal). Esto provoca un ligero cambio en la función de onda del fotón que va surgiendo de manera gradual conforme atraviesa el átomo miles de veces, hasta que el efecto se vuelve medible.

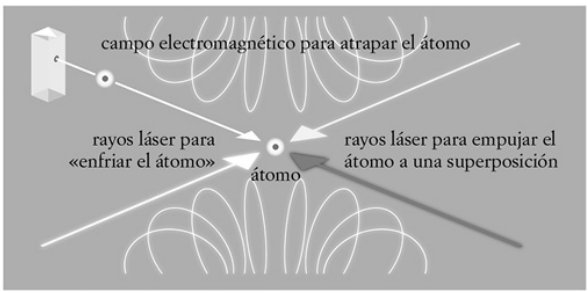
Los físicos del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica en Alemania han usado esta técnica para seguir la trayectoria de un átomo cuando pulula por dentro de la cavidad. Por supuesto, lo que sucede aquí equivale a una observación continua del átomo, de modo se este se comporta como una partícula clásica en todo momento.

Observación de la decoherencia en plena acción

Varios experimentos en el campo de la óptica cuántica han acaparado los titulares científicos de los últimos años. Durante tres cuartos de siglo, físicos teóricos y filósofos han debatido sobre ideas tan fundamentales como dónde radica la frontera entre el mundo cuántico y el clásico recurriendo a experimentos científicos y argumentos basados en distintas concepciones sobre la interpretación de la mecánica cuántica. Ahora, al fin, estas ideas se pueden poner a prueba en el laboratorio.

En el Capítulo 5 describí cómo ha resuelto la decoherencia una de las dos cuestiones fundamentales relacionadas con el problema de la medición (es decir, por qué nunca vemos gatos muertos y vivos al mismo tiempo). El fenómeno de la decoherencia revela, como sería de esperar, que no existe una línea divisoria clara entre los mundos micro y macro, sino que los efectos de interferencia de las superposiciones desaparecen cada vez más rápido a medida que aumenta la complejidad de un sistema cuántico. De modo que se destruyen a una

velocidad extrema en cuanto un sistema cuántico entra en contacto con su entorno macroscópico. El truco consiste, pues, en estudiar sistemas «mesoscópicos», situados en algún lugar intermedio, con la esperanza de pillar la decoherencia en plena acción.



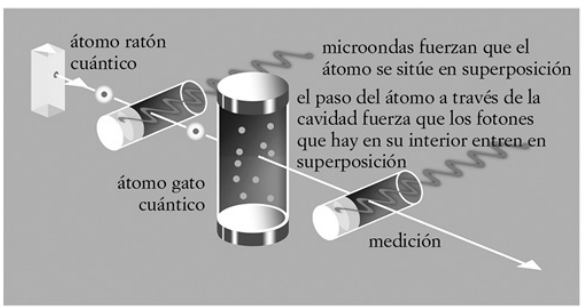
Experimento de 1996 en Boulder, Colorado, que creó el primer estado «gato de Schrödinger» en un átomo, primero atrapando un átomo dentro de un campo de fuerza, y después frenándolo mediante el enfriamiento con láser. Después se usaron dos láseres más para «forzarlo» a una superposición de estar en dos sitios a la vez.

En mayo de 1996, un grupo de investigadores experimentales del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) en Boulder, Colorado, crearon lo que ellos mismos llamaron un estado «gato de Schrödinger», donde el «gato» en cuestión era un átomo suelto. Primero atraparon el átomo y lo enfriaron con láser hasta la temperatura más cercana posible al cero absoluto sin violar el principio de incertidumbre[72]. A continuación le lanzaron una secuencia de pulsos láser controlados que lo forzaron a una superposición de dos estados cuánticos diferentes basados en la energía de los electrones externos del átomo.

De por sí, esto no es muy sorprendente. Los átomos se encuentran a menudo en superposiciones. Lo ingenioso fue el hecho de que los láseres lograran situar los distintos estados del átomo en un entrelazamiento cuántico con estados de su movimiento, de forma que también se situó en una superposición de moverse en dos direcciones al mismo tiempo. El átomo oscilaba de un lado a otro dentro de su trampa, de forma que ambos estados se movían completamente fuera de fase. La máxima separación entre ellos sería de casi mil veces el diámetro del átomo. Nótese que cuando digo «ellos» estoy hablando de las dos partes de la función de onda de un solo átomo.

Ah, pero yo sé que las funciones de onda no están localizadas en el espacio, así que esta clase de comportamiento no debería parecernos

tan extraña. Aun así, cada parte en oscilación de la función de onda tiene una extensión de tan solo la décima parte de la separación máxima entre las dos partes. Por eso esta situación es diferente del experimento habitual de la doble rendija. Al fin y al cabo, cuando un átomo atraviesa dos rendijas también se encuentra en una superposición de estar en dos lugares a la vez. Pero en ese caso las dos partes de la función de onda se extienden en cuando salen de las rendijas y se superponen, de ahí la interferencia entre ellas. En el caso que nos ocupa ahora, cada parte de la función de onda permanece localizada y no se extiende por el espacio. Cuando las dos partes se encuentran separadas al máximo hay muy poca superposición.



El experimento de París de 1996 que confirmó por primera vez que la decoherencia es un proceso físico real. El estudio de los estados de dos átomos (el gato cuántico y el ratón cuántico) pasados a través de una cavidad que contenía un campo magnético en una superposición, permitió medir la rapidez con que el campo entraba en decoherencia.

Una vez que pudieron crearse estos estados mesoscópicos de gato de Schrödinger, el siguiente paso consistió en usarlos para demostrar la naturaleza de la decoherencia. El primer experimento que lo logró, en diciembre de 1996, fue obra de un equipo encabezado por Serge Haroche, que trabajaba en la Escuela Normal Superior (ENS) de París. En lugar de limitarse a situar un átomo en superposición, lograron entrelazar el estado del átomo con un campo electromagnético consistente en tan solo unos pocos fotones atrapados dentro de una cavidad. De este modo, el campo electromagnético también se forzó a una superposición, la de oscilar con dos fases distintas a la vez.

Lo siguiente que hicieron fue medir cuánto tiempo podía mantenerse el campo electromagnético en esta superposición cuántica. En cuanto un solo fotón escapara de la cavidad y delatara el estado cuántico del campo al mundo exterior, se produciría una interacción con su entorno. Para medir lo rápido que ocurría eso, enviaron un

segundo átomo, al que llamaron «ratón cuántico»[73], que de por sí quedaría entrelazado con el estado cuántico del campo. Esto provocó una interferencia entre distintas partes de la función de onda del segundo átomo, que pudieron medir. Al cambiar el intervalo temporal antes de introducir el átomo ratón de Schrödinger lograron ver la decoherencia en plena acción. La velocidad a la que se pierde la superposición del campo electromagnético depende únicamente de lo «fuera de fase» que estén ambas componentes. Lo habitual es que este tiempo de decoherencia se pueda prolongar hasta la décima parte de un milesegundo. Al fin había una demostración impactante de que la decoherencia era real.

En tiempos más recientes ha habido gran interés por la perspectiva de lo que se conoce como «ingeniería de entorno», que consiste básicamente en evitar la decoherencia manteniendo las superposiciones cuánticas de átomos atrapados el máximo tiempo posible. ¿Y cómo se hace eso? Pues, una vez más, usando láseres. Solo que ahora se trata de un trabajo mucho más difícil que precisa el funcionamiento combinado de muchos láseres. Así, si sumamos los láseres que atrapan el átomo, los láseres que lo enfrían y los láseres que lo sitúan en una superposición, ¡estamos hablando de mucho trabajo para la industria láser!

Entrelazamiento que bate récords

Pillar la decoherencia en plena acción y controlarla tiene aplicaciones importantes en los campos emergentes de la criptografía cuántica, la computación cuántica y el teletransporte cuántico, del que hablaré a su debido tiempo en este mismo capítulo. Pero antes de hacerlo, vale la pena mencionar brevemente el avance reciente en el aprovechamiento de otra de las propiedades fundamentales de la función de onda: el entrelazamiento.

Cuando pase a hablar sobre la computación cuántica veremos que para hacer un uso real de las superposiciones cuánticas necesitamos entrelazar juntos muchos estados cuánticos. Durante la década de 1990, varios grupos lograron entrelazar juntos dos o tres átomos o fotones, pero no fue fácil. Una interacción con el entorno por parte de cualquiera de las partículas entrelazadas significaría una medición, y conllevaría el desmoronamiento de las delicadas superposiciones,

como un castillo de naipes. Más tarde, en marzo de 2000, el grupo del NIST comunicó en las páginas de *Nature*[74] la aplicación fructuosa de una técnica nueva para entrelazar una cadena de cuatro átomos atrapados. Cada átomo se colocó en una superposición y, entonces, los cuatro se entrelazaron entre sí. El método, decían, es ampliable a un número mucho mayor de partículas.

En septiembre de 2001 se informó de otro gran logro por parte de un grupo de Aarhus en Dinamarca que consiguió entrelazar los estados cuánticos de dos objetos macroscópicos: muestras de gas cesio, ¡cada una de las cuales contenía billones de átomos! El estado se mantuvo durante casi un milisegundo completo. Vale, no se ría, sé que un milisegundo no es mucho, pero sigue siendo algo muy impresionante. Es decir, si cada muestra hubiera estado en una superposición de dos estados de tal forma que en cada uno de ellos todos los átomos estuvieran haciendo lo mismo (todos en un solo estado de energía o todos girando en la misma dirección), entonces en cuanto uno solo de ellos se escapara, ya habría delatado el estado de toda la muestra y habría colapsado la superposición. Esto implicaría un tiempo de decoherencia inferior a un femtosegundo[75]. Sin embargo, ellos consiguieron mantener el estado entrelazado durante un espacio de tiempo ¡un billón de veces más largo!

Para lograr esto no optaron por lo que se denomina un entrelazamiento máximo, donde todos los átomos de cada muestra hacen lo mismo. En lugar de eso, situaron ambas muestras en una superposición de dos estados, en cada uno de los cuales algo más de la mitad de los átomos giraba en un sentido, mientras que el resto giraba en el contrario.

De este modo, si un átomo escapaba y delataba el estado de su espín, no bastaría para colapsar la función de onda de toda la muestra en uno u otro estado, puesto que el espín de ese átomo habría pertenecido tan solo a uno de los dos estados del total. Así pues, la pérdida de decoherencia en el estado de un solo átomo que pudiera escaparse solo causa un daño muy leve en la superposición global. Es decir, la detección del estado de un átomo no equivale a medir el estado de toda la muestra.

Criptografía cuántica

Las técnicas recién comentadas no son meras formas esmeradas de poner de relieve los aspectos más extraños de la mecánica cuántica. También tienen una finalidad práctica: contribuir a la consecución del sueño de construir algún día una computadora cuántica. Pero ya se ha logrado una aplicación cuántica viable del entrelazamiento. Se llama «criptografía cuántica».

Primero describiré en qué consiste la criptografía clásica. Si alguna vez le ha preocupado la seguridad de introducir el número de su tarjeta de crédito para comprar en internet, no lo haga (es decir, no se preocupe). Es extremadamente seguro, al menos de momento. Con los años, los matemáticos han buscado formas de permitir que dos partes intercambien información con una confidencialidad absoluta. La forma habitual de hacerlo consiste en mandar un mensaje codificado y confiar en que un intruso no será capaz de descifrarlo. Existen diversos trucos para garantizar la seguridad de los mensajes encriptados, como el sistema de «clave pública». La forma más simple de esta idea se basa en el siguiente ejemplo. Si quiero recibir un mensaje secreto de usted, le enviaré una caja vacía, abierta e inexpugnable junto con un candado abierto, del que solo yo tenga la llave. Usted colocará el mensaje dentro de la caja y la cerrará con el candado, antes de volver a mandármela. El candado utilizado solo se puede abrir con mi llave.

Sistemas como este dependen en la práctica de la idea de que ciertas operaciones matemáticas son más fáciles de resolver en un sentido que en el contrario, como la multiplicación y la factorización. Si le digo que x por y da 37 523, ¿cuánto tiempo le llevará factorizar esa cifra y darme el valor de x e y? En cambio, si le planteara el problema a la inversa, que 239 multiplicado por 157 da z, y le pidiera que hallara z, estoy seguro de que me daría la respuesta mucho más rápido. El método más usado para la encriptación con clave pública se basa en la dificultad que entraña factorizar números muy grandes. Hasta las computadoras más potentes tardan mucho en hacerlo. Así, por ejemplo, la factorización de un número formado por mil dígitos llevaría más tiempo que la edad del universo ¡incluso con la computadora más potente del mundo!

Sin embargo, si alguna vez lográramos construir una computadora cuántica, tal vez habría manera de factorizar números mucho más deprisa. En ese caso, la seguridad de los sistemas de encriptación actuales con clave pública no tardaría nada en verse amenazada.

Incluso sin computadoras cuánticas, no podemos descartar avances matemáticos que conduzcan al hallazgo de un algoritmo para factorizar números grandes. Por suerte, existe otro tipo de criptografía totalmente infalible, y también se basa en la mecánica cuántica.

La idea fundamental que subyace a la criptografía cuántica es que permite el intercambio de la «clave» criptográfica entre dos partes distantes (conocidas en la bibliografía especializada como Alice –en el lado *A* o emisor– y Bob –en el lado *B* o receptor–) con una seguridad absoluta que está garantizada por las leyes de la física. Esta clave es lo que permite al emisor codificar y al receptor decodificar el texto cifrado. Así que sería más correcto que la criptografía cuántica se llamara distribución de claves cuánticas.

Hasta el momento presente se han desarrollado dos técnicas. Ambas se basan en que, de acuerdo con la mecánica cuántica, cualquier intento por parte de un intruso para interceptar la clave implicará una medición de algún tipo, y esto inevitablemente alterará el sistema y alertará al emisor y al receptor. La primera de esas técnicas se denomina protocolo Bennett-Brassard, que debe su nombre a quienes la idearon en 1984, y se basa en que Alice y Bob midan e intercambien fotones. Algunas de sus propiedades, como la polarización, se pueden convertir entonces en un sistema binario de ceros y unos para conformar la clave. Sin entrar en más detalles técnicos, este método se sirve de la superposición cuántica y el principio de incertidumbre.

A comienzos de la década de 1990, Artur Ekert descubrió un segundo protocolo basado en las ideas de la deslocalización y el entrelazamiento. En este caso, Bob manda a Alice uno de los fotones que conforman un par entrelazado, el cual ella mide de alguna manera y vuelve a mandárselo a él. Al recibirlo, él realiza una medición del estado combinado que le permitirá determinar qué tipo de medición efectuó Alice. Para descifrar la clave Bob necesitará conocer una serie de las mediciones realizadas por Alice. Cualquier intento por parte de un intruso de interceptar el fotón afectará a su compañero y alertará a Bob.

La ley de Moore

No sé si aún lo conservo en algún lugar del desván, pero hace ahora

veinte años que compré mi primera computadora programable. Era una Sinclair ZX81[76] con una frecuencia de procesador de 3 MHz y 1 kilobyte de memoria. Yo amplié la memoria insertando en la parte trasera un cartucho de memoria RAM de 16 K, lo que al menos me permitía escribir códigos de más de una pantalla antes de llenar la memoria. Pero el más mínimo codazo soltaba la conexión física, complementada en mi caso con una capa generosa de pasta adhesiva, con lo que perdía y destruía todo lo que hubiera tecleado. Sea como fuere, nunca pude usarla para nada más que escribir programas cortos para efectuar cálculos relacionados con mis informes de laboratorio mientras estaba en la universidad, los cuales me llevarían un poco más de tiempo con una calculadora de bolsillo. En cambio, el equipo portátil con el que trabajo hoy tiene un tamaño parecido a aquel otro ordenador personal, pero cuenta con una velocidad de procesador de 1000 MHz (300 veces más rápido) y un espacio de disco de 15 gigabytes (un millón de veces más), y ya tiene más de un año, así que ha dejado de ser tecnología punta.

En 1965, el cofundador de Intel, Gordon Moore, auguró que la potencia de las computadoras se doblaría en el futuro cercano cada dieciocho meses. Su predicción, ahora llamada «ley de Moore», se ha revelado muy atinada y todos sabemos que debemos actualizar nuestros ordenadores personales con regularidad para seguir de cerca un *software* cada vez más sofisticado. Pero ¿hasta cuándo podrán seguir así las cosas? ¿Se sabe cuándo es probable que deje de funcionar la ley de Moore?

Pues resulta que tenemos una idea muy clara de cuándo sucederá eso si seguimos con la tecnología actual. En el capítulo anterior comenté que los láseres se usan para grabar los diminutos patrones de un circuito integrado sobre la superficie de un chip de silicio. El aumento de la potencia de las computadoras depende de la miniaturización continua de este proceso. Con los avances tecnológicos actuales deberíamos seguir igual que hasta ahora durante unos veinte años más, a medida que se vaya acortando más y más la longitud de onda de la luz láser utilizada. Sin embargo, también se ha planteado que la ley de Moore tendrá un final abrupto en el plazo de cinco o diez años debido a un problema insoslayable con el aumento de la miniaturización que se conoce como «ruido térmico». Pero, aun así, acabaremos llegando a lo que se denomina «barrera cero punto uno», que alude al momento en que la longitud de onda del rayo láser

sea tal que cada transistor del microchip mida tan solo 0,1 micras de ancho. Esto significa que unos mil, grabados todos seguidos de forma contigua sobre el chip, abarcarían el grosor de un solo cabello humano. Para entonces, la longitud de onda de los láseres habrá descendido hasta la banda de la luz ultravioleta y tendremos que encontrar una técnica diferente para crear imágenes de circuitos aún más diminutas sobre la superficie de silicio, como rayos X o incluso rayos de electrones, de longitudes de onda mucho más cortas. Otra posibilidad, como alternativa a la sucesiva miniaturización de los chips, consistirá en sustituir el silicio por arseniuro de galio. Este material semiconductor posee una estructura atómica que permitiría a los circuitos alojados en su superficie conducir electricidad mucho más deprisa.

A la larga acabaremos topándonos con otra barrera llamada «criterio de Rayleigh», que establece que los rasgos mínimos que se pueden resolver sobre el chip no pueden ser inferiores a la mitad de la longitud de onda del rayo. Una vez alcanzado ese estado hay que empezar a tener en cuenta efectos cuánticos. Una posibilidad que se está estudiando, por ejemplo, es aprovechar el entrelazamiento de fotones en el rayo láser para superar ese límite, pero probablemente no mucho más allá.

Cuando lleguemos a unas dimensiones moleculares, allá por el año 2020 más o menos, la era del chip semiconductor habrá llegado a su fin. Se está investigando en otros campos y ya hay dos propuestas que se revelan prometedoras. La primera consiste en usar computadoras biomoleculares, basadas en el hecho de que las moléculas de ADN son capaces de almacenar una cantidad increíble de información, así que tal vez puedan usarse algún día para confeccionar circuitos lógicos moleculares. La otra posibilidad consiste en usar transistores cuánticos basados en las propiedades de electrones sueltos atrapados artificialmente en «pozos cuánticos» no mucho más grandes que un átomo. Una alteración ligera del voltaje a través de esos pozos permite controlar el comportamiento de los electrones de un modo parecido al funcionamiento de un transistor.

Todos los avances mencionados son algo más que pura especulación, y harán que la potencia de la computación siga creciendo en el transcurso de nuestras vidas. Sin embargo, existe un número creciente de físicos cuánticos dedicados a poner de verdad a prueba la rareza cuántica y están convencidos de que en algún

momento del presente siglo conseguirán construir la máquina cuántica definitiva: una computadora cuántica.

Cubits

A comienzos de la década de 1980, hacia la misma época en que yo compré mi ZX81, Richard Feynman especulaba con la posibilidad de que tuviera sentido resolver ciertos problemas, como simular el comportamiento de un sistema cuántico, usando una computadora que también se comporte de manera cuántica. Un ordenador así utilizaría el concepto de superposición para crear tipos de algoritmos completamente nuevos. El campo de investigación de las computadoras cuánticas despegó pronto: ya en 1985 el físico de Oxford David Deutsch publicó un artículo pionero en el que manifestaba cómo podría lograrse tal cosa en la práctica.

Lo que proponía Deutsch era un prototipo de «computadora cuántica universal», igual que Alan Turing había planteado la idea de una computadora clásica universal medio siglo antes. La máquina de Deutsch operaría de acuerdo con principios cuánticos para simular cualquier proceso físico. Requeriría una serie de sistemas cuánticos capaces de existir de forma individual en una superposición de dos estados, como los átomos en superposiciones de dos niveles de energía. Entonces estos sistemas cuánticos se entrelazarían entre sí para crear puertas lógicas cuánticas capaces de realizar ciertas operaciones.

La idea fundamental es la del «bit cuántico» o cubit. El elemento básico de una computadora digital convencional lo conforma el «bit», un interruptor que puede situarse en una de dos posiciones posibles: encendido y apagado. Estas se representan mediante los símbolos binarios de 0 y 1. En cambio, si se usara un sistema cuántico, como un átomo, este podría existir en ambos estados al mismo tiempo. Por tanto, un cubit puede encontrarse encendido y apagado a la vez siempre y cuando se pueda mantener aislado de su entorno.

Como es natural, un solo cubit no resulta muy útil. Pero si entrelazamos dos o más cubits, empezamos a presenciar el poder de esta configuración. Pensemos en el contenido de información de tres bits clásicos. Cada uno de ellos puede encontrarse en la posición 0 o 1, y por tanto hay ocho combinaciones diferentes entre los tres (000,

001, 010, 100, 011, 101, 110, 111). Pero el entrelazamiento de solo tres cubits nos permiten almacenar esas ocho combinaciones ¡al mismo tiempo!

Si añadimos un cuarto cubit, tendremos 16 combinaciones, y un quinto nos brindará 32, y así sucesivamente. La cantidad de información almacenada crece de manera exponencial (como 2^N, donde *N* es el número de cubits). Imaginemos ahora que resolvemos operaciones igual que lo haríamos con bits clásicos. Podríamos realizar 2^N cálculos al mismo tiempo, lo último en procesamiento paralelo. Ciertos problemas que una supercomputadora convencional tardaría años en resolver, podrían descifrarse en una fracción de segundo.

Entonces ¿qué podría hacer una computadora cuántica?

Todo esto suena muy bien, pero ¿cómo podría usarse exactamente para resolver un problema real? Al fin y al cabo, si las computadoras clásicas son cada vez más rápidas y se pueden combinar a través de internet para trabajar en paralelo, ¿no acabaríamos alcanzando con el tiempo el mismo rendimiento de todos modos? La respuesta a estas preguntas se conoció en 1994 cuando Peter Shor, que trabajaba en los Laboratorios Bell de AT&T de Nueva Jersey, desarrolló el primerísimo algoritmo cuántico, una serie de instrucciones para realizar una tarea que solo podría ejecutar una computadora cuántica. El trabajo consistía en factorizar números muy grandes con una eficacia increíble, uno de los problemas principales de la ciencia de la computación. De inmediato quedó patente que las computadoras cuánticas, si pudieran construirse, tendrían un impacto trascendental en la banca y el comercio, puesto que los infalibles métodos actuales de encriptación de clave pública quedarían inservibles, y ahí es donde entraría en escena, por supuesto, la criptografía cuántica.

Unos años después, el matemático Lov Grover, compañero de Peter Shor, descubrió otro algoritmo cuántico. El algoritmo de Grover permitía que una computadora cuántica buscara en una base de datos desordenada mucho más rápido que cualquier motor de búsqueda convencional. Consideremos un ejemplo sencillo: si yo le pidiera que localizara una carta concreta dentro de un mazo bien barajado, usted tendría 1 posibilidad entre 48 de dar con ella a la primera. Desde

luego, podría ser que tuviera usted suerte, pero también podría no tenerla y, tras comprobar y eliminar una a una cada carta de la baraja, dar con ella al final de todo el mazo. Tras muchos intentos, descubriría que el promedio de veces necesarias para localizar la carta asciende a 24 (la mitad del mazo). Una computadora cuántica que empleara el algoritmo de Grover sería capaz de localizar la carta, en promedio, en unos siete intentos. La explicación matemá- tica es que, en una base de datos de N entradas, una computadora convencional necesita $N/2$ intentos, mientras que una computadora cuántica logrará localizar la entrada en cuestión en una cantidad de pasos igual a la raíz cuadrada de N.

Aunque el algoritmo de Grover no es tan espectacular como el de su compañero Peter Shor, despliega todo su potencial, por ejemplo, en una partida de ajedrez entre una computadora cuántica y otra convencional, puesto que la primera será capaz de pensar los movimientos miles de millones de veces más rápido.

Computación cuántica

Andrew Steane, profesor de Física, Universidad de Oxford

Los ordenadores de hoy, con todos sus prodigios, operan siguiendo el mismo principio fundamental que los dispositivos mecánicos soñados por Charles Babbage en el siglo XIX y formalizados más tarde por Alan Turing: cada estado estable de la máquina representa un número. Incluso los modelos de computación no estándar, como el basado en el ADN, comparten este principio básico. ¿Qué otra cosa podrían hacer? Pero las leyes que describen el mundo natural son las sutiles leyes de la física cuántica, y nos invitan a pensar de un modo diferente acerca de la computación. La física cuántica ofrece métodos poderosos para manipular la información que solo estamos empezando a desentrañar.

La computación cuántica aúna dos de las revoluciones conceptuales más significativas del siglo XX: la ciencia de la información y la física cuántica. Resulta que ambas encajan muy bien porque el lenguaje de la física cuántica se parece mucho al lenguaje de la información: la función de onda cuántica se define como una entidad matemática que expresa todas las propiedades de un sistema físico determinado, de modo que la función de onda es como una cantidad de información. Los procesos físicos la alteran, de modo que si diseñamos procesos adecuados, entonces la evolución de la función de onda será una forma de procesamiento de información que podemos controlar. Lo relevante y emocionante de la computación cuántica es que esta revolución cuántica se puede utilizar para tomar atajos muy poderosos y realizar ciertos cálculos que sencillamente no son viables con otros dispositivos.

El elemento más simple de información cuántica es el «cubit», el primo cuántico del «bit» clásico, un interruptor que puede tener dos posiciones, o 0 o 1, mientras que un cubit puede hallarse en una superposición correspondiente tanto a 0 como a 1 al mismo tiempo. Un solo cubit se puede almacenar en un solo átomo o un único fotón de luz. La sutileza y el poder de la computación cuántica aparece en el siguiente paso. Si solo pudiéramos manipular muchos cubits por separado, entonces la computación conseguida no ofrecería ninguna ventaja en cuanto a capacidad de procesamiento frente a las computadoras convencionales. Sin embargo, según la física cuántica, los cubits pueden hallarse en estados entrelazados. Con ellos el estado de un cubit mantiene una correlación estrecha con el estado de otro. Por ejemplo, pueden encontrarse en un estado que garantice que ambos almacenen el mismo número (los dos el 0 o los dos el 1), pero sin que ninguno de los cubits por sí solo almacene

un 0 o un 1.

En una computadora cuántica se usan estados entrelazados que implican muchos cubits. Primero, la computadora se prepara con todos los cubits en un estado simple, como 0 (girando en un sentido, arriba o abajo). Después los cubits se enlazan entre sí mediante «puertas lógicas» cuánticas que hacen que el espín de un cubit se entrelace con el de otro, de forma que los detalles vengan establecidos por el programa que esté ejecutando la máquina. El proceso continúa, pero el programa está diseñado con esmero para que, al terminar, los cubits vuelvan a estar desentrelazados, es decir, recuperen estados simples, como arriba o abajo (0 o 1). El estado final de todo el conjunto arroja el resultado de la computación, que se puede leer realizando mediciones sobre los cubits.

De momento no está claro cómo interpretar mejor la ventaja computacional que ofrece el entrelazamiento. Una propiedad es que como cualquier cubit puede aportar a la vez un 0 y un 1 a cualquier estado dado, cada vez que se introduce un nuevo cubit en la computadora, se dobla la cantidad de contribuciones al estado global de la computadora, lo que genera una cantidad verdaderamente descomunal de contribuciones (por ejemplo, 2100 = 1267 mil cuatrillones para tan solo 100 cubits). En ciertos aspectos, la computadora cuántica funciona como una cantidad inmensa de computadoras convencionales ¡que calculan todas a la vez! Sin embargo, esta imagen no capta todo lo que está pasando, porque cada parte suelta de cualquier cálculo cuántico de ese tipo no puede ser completamente independiente, y además hay que volver a unirlas (hacer que interfieran entre sí) antes de obtener un resultado significativo.

En el programa cuántico más conocido de todos, el algoritmo de factorización de Shor, el entrelazamiento se utiliza para permitir que dos grupos de cubits almacenen un conjunto de números correlacionados, de manera que cada número del segundo grupo viene dado por una operación matemática determinada (como podría ser una exponenciación) con el número correspondiente del primer grupo. El programa cuántico instruye a la computadora para que manipule el primer grupo de forma que, a través de los prodigios del entrelazamiento, se revele una propiedad común a todos los números del segundo grupo, como que todos sean pares o que todos sean múltiplos de algún número desconocido que está por descubrir. Esta información se puede emplear para identificar los factores primos de cualquier entero, lo que, por cierto, permitiría descifrar la mayoría de los esquemas de encriptación empleados en la actualidad en el mundo de los negocios y de la política.

La carrera se centra ahora en construir la primera computadora cuántica, pero el entrelazamiento es delicado, y de momento el control preciso de grandes cantidades de cubits está fuera del alcance de nuestra capacidad tecnológica.

Puertas lógicas cuánticas

Una puerta lógica es un dispositivo de computación que realiza una operación simple si se le introducen uno o más bits de información. La manera en que lo efectúa se basa en un campo matemático que se conoce como álgebra booleana, en honor a George Boole, quien la desarrolló en el siglo XIX. Los circuitos lógicos complejos que conforman el «cerebro» de una computadora se crean a partir de puertas, así que reciben información binaria de ceros y unos, y después siguen instrucciones sencillas para hacer algo con ellos. Un transistor actúa como una puerta lógica que efectúa una operación de ese tipo convirtiendo sus dos entradas (cada una de las cuales puede ser 0 o 1) en una salida única que será 0 o 1.

Existen varias clases de puertas lógicas, como la puerta «AND» (Y: solo cuando ambas entradas son 1, la salida será 1) y la puerta «OR» (O: la salida es 1 cuando al menos una de las entradas es 1). La creación de combinaciones de estas puertas simples con la puerta «NOT» (NO: que toma una entrada y la invierte, convirtiendo 0 en 1 o 1 en 0) nos permite construir operaciones lógicas más sofisticadas. Así que, al combinar un par de puertas NOT, un par de puertas AND, y una puerta OR ya contamos con los rudimentos de un dispositivo para realizar sumas (llamado O exclusivo, o puerta «XOR».

La lógica cuántica funciona de la misma manera, solo que ahora tenemos que seguir todas las posibilidades. Los algoritmos cuánticos como los de Shor y Grover se basan en el orden

especial en que se efectúan las operaciones lógicas sobre dos o más cubits. Sin embargo, en lugar de pasar corrientes eléctricas a través de diodos semiconductores, ahora manipulamos superposiciones de estados cuánticos con láseres o campos magnéticos.

El ejemplo más simple de cubit es un solo electrón (o cualquier partícula con un espín cuántico capaz de orientarse en paralelo o en perpendicular con respecto a un campo magnético aplicado). La aplicación de un pulso electromagnético adicional durante el tiempo necesario puede invertir el espín del electrón. Esto es un ejemplo de puerta NOT. Otra operación cuántica es la correspondiente a alterar el espín del electrón tan solo hasta la mitad. Eso lo sitúa en una superposición de girar arriba (1) y abajo (0) al mismo tiempo. Esta operación recibe el nombre de «raíz cuadrada de NOT» (u operación SRN). Con dos electrones entrelazados de forma que ambos empiecen a girar del mismo modo, una operación SRN los sitúa en una superposición de cuatro estados posibles: 00, 01, 10 y 11. Con más cubits se pueden confeccionar algoritmos cuánticos más complicados. Por ejemplo, los estudiosos han logrado crear el equivalente cuántico de una puerta XOR, lo que les permite realizar la adición simple.

Una vez completado el algoritmo, se selecciona uno de los estados finales posibles, el cual deberá amplificarse para poder leerlo mediante algún dispositivo macroscópico. Por supuesto, este solo es uno más de los muchos problemas de ejecución que aún están pendientes de resolverse.

Clonación cuántica

Muchos de los emocionantes avances y prometedoras aplicaciones futuras de la mecánica cuántica, como la criptografía y la computación cuánticas, se basan en el campo relativamente reciente de la teoría de la información cuántica. Una materia que aún no se ha explorado por completo y que repercutirá en todas esas tecnologías es la clonación cuántica.

Aunque estamos al tanto de los avances en genética y la clonación de animales, y posiblemente algún día también de seres humanos, es importante subrayar que, en esos casos, el clon no es idéntico al original, sino que más bien se limita a contar con el mismo código genético. En mecánica cuántica, un clon es en todos los sentidos idéntico a la partícula o el sistema cuántico del que se copió. En 1982 William Wooters y Wojciech Żurek presentaron una demostración matemática de que es imposible la clonación perfecta de un sistema cuántico arbitrario. Por supuesto, si ya sabemos de antemano cuál es el estado cuántico, podemos construir, en principio, un dispositivo de clonación cuántica que producirá copias idénticas de sí mismo, pero ningún dispositivo de clonación de ese tipo se podrá emplear de forma universal con todos los sistemas cuánticos.

Para clonar un objeto, antes tenemos que saberlo todo sobre él. Esto se hace mediante la medición. Una vez recopilada toda la información necesaria, podemos usarla para construir un clon. Pero hasta ahora hemos visto que medir un sistema cuántico no nos permite hacer eso (siempre se pierde algo con el acto de la medición). Esto se debe a que estamos convirtiendo información cuántica en información clásica. Por ejemplo, un fotón que se encuentre en una superposición arbitraria de distintos estados de espín o de polarización, exhibirá, al medirlo, uno u otro de esos estados, pero nunca la superposición. Por tanto, no podemos conocer las amplitudes relativas de las distintas partes de la superposición original ni de qué manera se combinaron (su fase). Esto no es nada bueno para la clonación.

Desde la demostración de Wooters y Żurek, los estudiosos se han dado cuenta de que, en teoría, se puede construir lo que se denomina un clonador cuántico universal que, aunque jamás será perfecto, puede tener un índice de éxito (o «fiabilidad») bien definido.

La clonación cuántica podría revelarse útil si alguna vez construimos una computadora cuántica. En lugar de efectuar operaciones secuenciales en un cubit, el cubit se puede clonar primero varias veces para lograr un procesamiento en paralelo mucho más eficiente con todos los clones funcionando al mismo tiempo. Pero es más urgente desentrañar qué fiabilidad tendrá la criptografía cuántica si un intruso consigue crear siquiera clones aproximados de fotones utilizados para la transmisión de mensajes.

Cómo confeccionar una computadora cuántica

En la actualidad hay varias maneras de materializar el sueño de construir una computadora cuántica en la práctica. Todas se basan en la idea de manipular superposiciones entrelazadas de átomos, pero en última instancia todas adolecen del mismo problema: cómo evitar que se produzca la decoherencia y se destruya el delicado cálculo. Perfilaré aquí un par de técnicas que se están investigando en la actualidad. Una utiliza la idea de la manipulación de átomos sobreenfriados con láseres, y la otra se sirve de la resonancia magnética nuclear (RMN).

El primer método ya lo mencioné con anterioridad al describir los diversos experimentos efectuados por los grupos de París (el grupo del ENS) y de Colorado (el grupo del NIST). Por ejemplo, el grupo del NIST ha propuesto un método en la línea del planteamiento original que expuso David Deutsch en su artículo de 1985. Proponen atrapar una cadena de átomos (a unas veinte micras de separación) dentro de lo que se conoce como «procesador cuántico de trampa iónica». Parejas de rayos láser entrecruzados fuerzan a cada átomo (que actúa como un cubit) a una superposición de dos estados de energía. Los átomos son en realidad iones con carga eléctrica, de ahí que se produzca repulsión eléctrica entre ellos, y, por tanto, están comunicados entre sí y, por ende, en un estado entrelazado colectivo. Vibran a un lado y a otro de una manera controlada, de manera que su movimiento relativo está acoplado mediante el intercambio de cuantos de energía vibratoria.

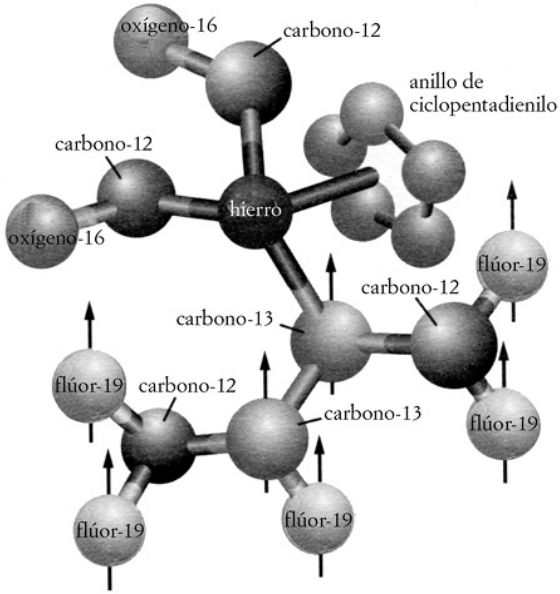
Otra posibilidad consiste en utilizar la técnica de la resonancia magnética nuclear, donde el espín de los núcleos atómicos en moléculas de diseño se controla con un campo magnético, y cada núcleo se comporta como un imán minúsculo. Como es natural, no podemos seguir los estados del espín de cada átomo individual, pero lo que importa son las propiedades generales del material, que contiene cien mil trillones de moléculas. Cada molécula constituye un procesador cuántico RMN, donde los cubits son los núcleos de los átomos que conforman la molécula.

Un ejemplo de molécula así lo ofrece el cloroformo, que consiste en cinco átomos (uno de carbono, tres de cloro y uno de hidrógeno). En lugar de usar el isótopo común del carbono, el carbono-12, cuyo núcleo tiene un espín global nulo, se usa el isótopo raro, el

carbono-13. Su núcleo posee un espín debido al neutrón adicional que contiene. Este núcleo, junto con el protón (el núcleo del átomo de hidrógeno), puede tener dos direcciones de espín diferentes (su número cuántico de espín es un medio, de modo que pueden tener espín «arriba» o «abajo»). Aplicando un pulso de radiofrecuencia al protón, se puede situar en una superposición de girar en ambas direcciones al mismo tiempo. La proximidad de los dos núcleos y el enlace químico dentro de la molécula garantiza el entrelazamiento de sus estados, y la superposición del estado del espín se transfiere al núcleo de carbono[77].

Por último hablaré con brevedad tan solo sobre una de las demás ideas que existen hoy para construir una computadora cuántica. Esta, aún en una fase muy preliminar, se basa en las dos aplicaciones de la mecánica cuántica que comenté por extenso en el capítulo anterior: el láser y el microchip. Podemos hacer que una nube de átomos enfriada con láser hasta tan solo una milésima de un grado por encima del cero absoluto, flote sobre un chip semiconductor mediante campos magnéticos producidos por las minúsculas corrientes eléctricas que circulan por los circuitos integrados del chip. La altura y la velocidad de los átomos se puede controlar al tiempo que son guiados a lo largo de los contornos del campo magnético. De este modo tal vez sea posible controlar con precisión el entrelazamiento de los estados cuánticos de los átomos.

Para todos los tipos posibles de computadora cuántica, el obstáculo de momento consiste en aislar las delicadas superposiciones de su entorno. Cuantos más cubits estén entrelazados, más deprisa se produce la decoherencia. Sin embargo, se están logrando avances en diversos frentes. Por ejemplo, en el procesador de trampa iónica se puede controlar la forma en que interaccionan los iones con su entorno si se escogen con buen criterio las propiedades de ese entorno.



Computadora cuántica de siete cubits que sorprendió al mundo en 2001, creada por la Universidad de Stanford y el Centro de Investigación Almaden de IBM en California. Esta molécula, conocida como complejo ferro-perfluoro-butadienilo, y empleada en un sistema de RMN, fue la primera en llevar a la práctica el algoritmo de Shor para factorizar un número, ¡aunque solo fuera el número 15!

Otro truco ingenioso consiste en usar lo que se denomina corrección cuántica de errores para compensar la decoherencia. Esto introduce una redundancia que implica que la misma información se distribuya por muchos cubits. De esta forma, si la superposición de uno de los cubits se ve afectada de algún modo, el cálculo podrá seguir realizándose con fiabilidad porque la misma información se encuentra codificada en otros cubits intactos.

El cerebro cuántico

Queda una última interpretación de la mecánica cuántica que aún no hemos comentado. Merece que hablemos de ella por dos razones. La primera es que la planteó uno de los físicos matemáticos más respetados de su generación, Roger Penrose. La segunda es que podría explicar la única rama de la ciencia que es más misteriosa que la mecánica cuántica: el origen de la consciencia.

Según Penrose, las superposiciones de distintos estados cuánticos no se colapsan debido al acto de medirlos, ni a la presencia de un observador consciente, ni tan siquiera a la interacción con el entorno. Considera que en su opinión, ese proceso se da incluso en un sistema aislado a través de un proceso físico vinculado a la mismísima naturaleza del propio espaciotiempo. De acuerdo con Penrose, la «reducción objetiva», o colapso, de la función de onda, sucede debido a las distintas geometrías espaciotemporales de cada estado en la superposición. (Así, si una partícula se encuentra en una superposición de estar en dos lugares, la curvatura del espaciotiempo diferirá de acuerdo con el lugar donde sea más probable que se encuentre la masa de la partícula). Cuando la diferencia en cuanto a geometrías alcanza un nivel crítico, como cuando la partícula se entrelaza con el entorno, la

superposición se torna inestable y se colapsa en solo uno de los estados posibles. Por supuesto, ni Penrose ni nadie conoce los detalles de este mecanismo, dado que aún no disponemos de una teoría completa de la gravitación cuántica.

Penrose y Stuart Hameroff han aplicado esta interpretación para explicar de qué modo podría accionarse la consciencia dentro del cerebro. Antes de nada debo aclarar que apelan a la mecánica cuántica porque creen que nuestra forma de «razonar» difiere de un modo fundamental del modo en que una computadora procesa algoritmos. Este carácter «no computable» del pensamiento consciente debe requerir, según ellos, algo que trasciende a la física clásica, es decir, la física cuántica. Y creen haber encontrado el recipiente biológico adecuado para proteger la delicada coherencia cuántica del cerebro frente al entorno exterior.

Las neuronas del cerebro contienen polímeros cilíndricos huecos llamados «microtúbulos». Estos consisten a su vez en proteínas sueltas llamadas «tubulinas» y que pueden existir en una superposición de dos formas ligeramente distintas. Penrose y Hameroff sostienen que los microtúbulos poseen las propiedades perfectas para que se mantenga esa superposición, y se extienda a las tubulinas circundantes. De este modo una superposición coherente dura un tiempo considerable, lo que permite la aparición de procesos preconscientes. La reducción objetiva de la superposición se produce cuando se alcanza el umbral crítico de Penrose y se activa la consciencia. Por supuesto, esto estaría ocurriendo en todo momento dentro del cerebro. Después de todo, quizá no necesitemos construir una computadora cuántica; ¡cada uno de nosotros lleva una dentro de la cabeza!

En la actualidad se han diseñado computadoras cuánticas formadas tan solo por unos pocos cubits. Es posible que en un futuro próximo se pueda confeccionar una computadora cuántica con hasta cuarenta cubits. Pero para tener una computadora cuántica operativa necesitaríamos entrelazar miles de cubits y evitar la decoherencia durante el tiempo suficiente para efectuar cómputos útiles.

Teletransporte cuántico

El teletransportador que lleva a bordo la nave estelar *Enterprise* de *Star Trek* es bien conocido por los millones de seguidores que tiene esta serie, porque el aparato permite trasladar a la tripulación de la nave hasta y desde los planetas, no ya creando copias idénticas, sino destruyendo y volviendo a crear luego a la persona en cuestión, de alguna manera indeterminada. Como es ciencia ficción, nadie se molesta de verdad en conocer los detalles, aunque estoy seguro de que los «trekis» tienen su propia explicación.

La idea general del teletransporte consiste en escanear un objeto de tal modo que lo que se transporte sea pura información, la cual se usa para reconstruir el original a partir de la materia prima adecuada (la clase correcta de átomos) en el lugar de destino. De esta manera el proceso puede realizarse a la velocidad de la luz, a diferencia de la transferencia física de los átomos del objeto de partida, los cuales

habría que desplazar por medios más lentos. No parece una gran ventaja a menos que se trate de distancias muy largas y se precise un teletransporte a la velocidad de la luz.

Tal vez crea usted que esto no es más que una tontería inofensiva. Bueno, lo fue hasta 1993. Aquel año Charles Bennett y su grupo de colaboradores internacionales evidenció que, gracias a la mecánica cuántica, el teletransporte perfecto es teóricamente posible, si bien de momento solo a escala cuántica. Hasta entonces se pensaba que el teletransporte de un sistema cuántico se regía por el principio de incertidumbre: no podemos escanear un sistema cuántico y obtener toda la información posible sobre él para reconstruirlo después en otro lugar. Esto es cierto, desde luego, pero el nuevo ingrediente que evita este problema es, una vez más, el entrelazamiento.

La idea básica es la siguiente. Llamemos x a la partícula que hay que teletransportar de A a B. El dispositivo que utilizaremos también contiene dos partículas similares, y y z. Estas dos partículas están entrelazadas y se envían a cada una de las posiciones A y B. Ahora bien, en el punto A tenemos la partícula original que queremos teletransportar, x, junto con la partícula y. Al medir las dos juntas de un modo determinado, obtenemos cierta información sobre x. El resto de la información de x se pierde sin remedio, puesto que el principio de incertidumbre no nos permite conocer todo lo que debemos saber sobre ella.

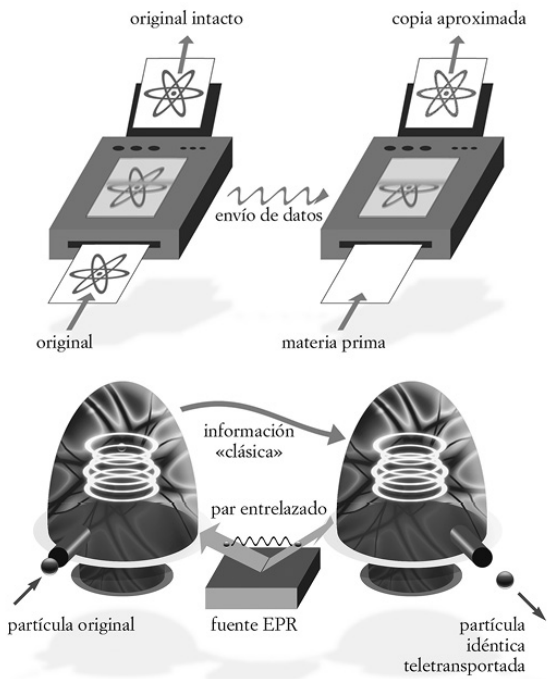
Sin embargo, el acto de medir habrá colapsado ahora también el estado entrelazado de y y z, y habrá comunicado a z, que se encuentra en B, información relacionada con la información que se perdió de x al medirla con y.

La información obtenida al escanear x se transmite ahora a B por medios más convencionales y esto, junto con la información que ya hay en z, nos brinda toda la información que necesitamos en el nuevo lugar B. Ahora se puede codificar esta información en una partícula similar a x y esencialmente habremos reconstruido x con exactitud en B.

Es importante insistir en que el teletransporte cuántico no es ninguna clase de transporte instantáneo no local, ya que parte de la información necesaria para reconstruir el sistema cuántico en el destino aún se tiene que transferir de manera clásica (es decir, no más rápido que la velocidad de la luz). Pero lo bueno del método es que el resto de la información, que se pierde durante el proceso de escaneo/

medición, y que creíamos que el principio de incertidumbre nos negaría, se puede volver a recuperar en el destino gracias a las correlaciones no locales de las partículas entrelazadas.

Debo señalar también que, una vez que tenemos toda esa información, estamos haciendo algo más que crear una mera réplica de la partícula original. Estamos alterando su estado cuántico (mediante el acto de la medición) y creándolo de nuevo. No es necesario transferir físicamente la partícula en sí, puesto que los atributos cuánticos lo son todo; la información lo es todo. Dos partículas cuánticas en el mismo estado cuántico son de verdad idénticas de un modo que no tiene parangón en el mundo clásico. Así que transferir toda la información que contiene una partícula cuántica equivale a transferir la partícula en sí.



Diferencia entre el teletransporte cuántico y una transmisión normal realizada por fax.
Arriba: Cuando se envía una imagen por fax, la página original permanece intacta y lo único que se genera es una copia aproximada de ella.
Abajo: En el teletransporte cuántico se pierde toda la información que conforma la partícula original, pero en el otro extremo se genera una copia perfecta de ella.

Desde luego, ampliar esto al teletransporte humano es una cosa completamente distinta. ¿Se imagina el nivel de entrelazamiento

necesario para transportar el estado cuántico completo de todas las partículas que conforman nuestro cuerpo? ¡Solo pensar en la decoherencia ya da dolor de cabeza!

Nadie puede predecir a qué velocidad se lograrán avances en el futuro. Algunos físicos creen que jamás lograremos crear una computadora cuántica, mientras que otros creen que se conseguirá en cuestión de una década o así.

Sea como sea, una cosa es segura: no hemos visto lo último de la cuántica.

El futuro es esplendoroso. El futuro es la cuántica.

71. Técnicamente decimos que se produce un desplazamiento en la fase del fotón. La noción de fase está ligada al comportamiento ondulatorio (como en las expresiones «en fase» y «fuera de fase»), y sin embargo se puede aplicar a un solo fotón de luz, que se describe mediante su función de onda (una cantidad que porta información de fase).

72. En el cero absoluto, un átomo tendría que estar estacionario (con cero cantidad de movimiento) y quieto en un lugar determinado. Pero en ese caso conoceríamos su posición y su cantidad de movimiento con exactitud, lo que viola el principio de incertidumbre. Así que los átomos siempre tendrán una pequeña cantidad de energía que se conoce como su «energía de punto cero», y nunca podremos llevarlo hasta el cero absoluto.

73. Ya que serviría para revisar el estado del «gato cuántico».

74. C. A. Sackett *et al., Nature,* vol. 404 (16 de marzo de 2000), p. 256.

75. Elija una de estas definiciones: un femtosegundo equivale a 10-15 segundos; o a una milmillonésima de microsegundo; o a la millonésima parte de una milmillonésima de segundo; o... bueno, en cualquier caso es un espacio de tiempo muy corto.

76. En Estados Unidos lo comercializó Timex como TS-1000. En el Reino Unido fue el primer ordenador que se pudo comprar por menos de 100 libras (unos 140 €).

77. Lo que ocurre es que los cambios en la orientación del espín de los núcleos repercute en las funciones de onda de los electrones que orbitan dentro de los dos átomos y, por tanto, en el enlace entre ellos.

Bibliografía adicional

Hay muchos libros divulgativos sobre mecánica cuántica y otros temas relacionados de la física moderna. Sin embargo, muchos no logran transmitir las ideas fundamentales al público no experto. Esta es mi selección personal de los que sí lo consiguen:

Jim Al-Khalili, *Black Holes, Wormholes and Time Travel* (Institute of Physics Publishing, 1999). Quizá no sea de extrañar que recomiende este libro como ¡la explicación más clara que se ha escrito nunca sobre las teorías de la relatividad de Einstein y la naturaleza del espacio y el tiempo!

Julian Barbour, *The End of Time* (Phoenix, 1999). Una obra dura para los no iniciados, pero que vale la pena esforzarse en leer. Barbour describe una teoría absolutamente nueva sobre la naturaleza del tiempo. Su propuesta: abandonar por completo la noción del tiempo en su conjunto, porque no es más que una ilusión. De paso, describe la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, y por qué deberían reconciliarse.

James T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (University of Chicago Press, 1994). Jim Cushing, ya fallecido, plantea que si David Bohm hubiera estado presente en los albores de la mecánica cuántica, su visión del significado de la teoría se habría considerado la estándar, en lugar de la formulación de Copenhague, muy distinta a la de Bohm. Se trata de un libro que da que pensar, si bien es un tanto sesudo para los legos en la materia.

Paul Davies y Julian Brown, *El espíritu en el átomo* (Madrid, Alianza Editorial, 1989; trad. castellana de Lucyna Lastowska). Tras una exposición clara de la teoría cuántica en el primer capítulo, el resto de la obra se basa en una serie de entrevistas en la BBC realizadas por Paul Davies a diversos expertos eminentes en física cuántica. Ofrece varias consideraciones personales únicas sobre el significado de la mecánica cuántica. Una lectura muy amena.

Brian Greene, *El universo elegante* (Barcelona, Crítica, 2012; trad. castellana de Mercedes García Garmilla). Un libro premiado que ofrece un relato amplio sobre la búsqueda de una teoría del todo. Greene es uno de los mayores expertos en teoría de cuerdas y, aunque es un volumen extenso, bien vale la pena. Tras comenzar con la teoría

de la relatividad y la mecánica cuántica, la lectura nos va guiando por todo el recorrido necesario para llegar al espaciotiempo deca y endecadimensional.

John Gribbin, *Schrödinger's Kittens and the Search for Reality* (Weidenfeld & Nicolson, 1995). Gribbin es un maestro consumado en el juego de desmitificar la mecánica cuántica. Este libro es una continuación de su clásica obra *En busca del gato de Schrödinger* (que introdujo a toda una generación en los misterios de la mecánica cuántica en la década de 1980). En este volumen, Gribbin se muestra crítico con la interpretación de Copenhague, la estándar, y se alinea con otra interpretación distinta. ¡Habrá que leer el libro para saber cuál es!

Tony Hey y Patrick Walters, *El universo cuántico* (Madrid, Alianza, 1989; trad. castellana de Ana Gómez Antón). Un libro con ilustraciones preciosas sobre los principios de la mecánica cuántica y las numerosas aplicaciones que encuentra en nuestra vida cotidiana, desde la electrónica hasta la astronomía.

Michio Kaku, *Visiones: cómo la ciencia revolucionará la materia, la vida y la mente en el siglo xxi* (Barcelona, Debate, 1998; trad. castellana de Fabián Chueca). Un libro fabulosamente inspirador que augura que la ciencia del siglo XXI probablemente nos cambiará la vida, con avances que abarcarán desde la ingeniería genética hasta la inteligencia artificial, las computadoras cuánticas y mucho más.

David Lindley, *Where Does the Weirdness Go?* (BasicBooks, 1996). Esta obra desmitifica con eficacia los conceptos que subyacen a la mecánica cuántica sin llegar a ser un volumen técnico, y el autor aporta argumentos de peso en defensa de la interpretación estándar (de Copenhague) de la mecánica cuántica.

Ray Mackintosh, Jim Al-Khalili, Björn Jonson y Teresa Peña, *Nucleus: A Trip into The Heart of Matter* (Canopus, 2001). Este libro, probablemente el único de gran formato con ilustraciones de lujo sobre física nuclear, ofrece numerosas interpretaciones de la naturaleza de los átomos y sus núcleos. Describe cómo nació la física nuclear y el papel que ha desempeñado la mecánica cuántica en su desarrollo, así como las numerosas aplicaciones que tiene en la actualidad, desde la medicina nuclear hasta la explicación de por qué brilla el Sol.

J. P. McEvoy y Óscar Zárate, *Teoría cuántica para principiantes* (Buenos Aires, Era Naciente, 2010; trad. castellana de Óscar Zárate). Un recorrido paso a paso y con ilustraciones fantásticas por la historia

de la teoría cuántica a medida que se fue desarrollando con el trabajo de personalidades clave a lo largo del siglo XX. El ilustrador Óscar Zárate ganó el premio Will Eisner a la mejor novela ilustrada, pero este paseo delicioso y agradable no tiene nada de ficción.

N. David Mermin, *Boojums All The Way Through* (Cambridge University Press, 1990). Una recopilación de ensayos de un físico eminente en cuántica. Es, sencillamente, la mejor obra para leer sobre la teoría de Bell y la deslocalización en mecánica cuántica, pero incluye muchas más grageas fascinantes e interesantes de este renombrado comunicador de la ciencia.

Roger Penrose, *La nueva mente del emperador* (Barcelona, DeBolsillo, 2009; trad. castellana de Javier García Sanz). Este libro causó un gran revuelo cuando salió y dio lugar a una serie de conferencias internacionales para debatir sobre las ideas de Penrose en relación con la naturaleza de la consciencia y la inteligencia artificial. Incluye un apartado estupendo sobre mecánica cuántica, y describe una ruta posible hacia una teoría de la gravitación cuántica.

Lee Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity* (Weidenfeld & Nicolson, 2000). La visión de un científico en activo sobre el camino que queda por recorrer en la búsqueda de una teoría de la gravitación cuántica.

Daniel F. Styer, *The Strange World of Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 2000). Dan Styer ofrece una descripción clara del significado del experimento Einstein-Podols- ki-Rosen y del teorema de Bell. Aunque es una obra más sesuda que otras, vale la pena el esfuerzo de leerla si estamos dispuestos a ello.

Y si todo esto no fuera suficiente para usted, siempre podrá echar una ojeada a los siguientes libros, muchos de ellos clásicos populares y superventas: J. C. Polkinghorne *(The Quantum World),* Frank Close *(The Cosmic Onion),* George Gamow *(El breviario del señor Tompkins),* R. P. Feynman *(Electrodinámica cuántica: la extraña teoría de la luz y la materia),* Paul Davies *(Superfuerza),* David Deutsch *(La estructura de la realidad).*

Título original: *Quantum. A Guide for the Perplexed*
Traducción de Dulcinea Otero-Piñeiro
Revisión científico-técnica de David Galadí-Enríquez, doctor en Física

Edición en formato digital: 2022

Publicado por primera vez en inglés en 2003 por Weidenfeld & Nicolson, un sello de Orion Publishing Group, London

The Road Not Taken from *The Poetry of Robert Frost,* edited by Edward Connery Lathem. Published in the United Kingdom by Jonathan Cape. Reprinted by permission of the Random House Group Ltd.

The Road Not Taken from *The Poetry of Robert Frost,* edited by Edward Connery Lathem. Copyright 1916. Published in the US in 1969 by Henry Holt and Co., copyright 1994 by Robert Frost. Reprinted by permission of Henry Holt and Company, LLC

© Jim Al-Khalili 2003
© de la traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro, 2016
© de la revisión científico-técnica de la traducción: David Galadí-Enríquez, 2016
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2016, 2022
Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15
28027 Madrid
www.alianzaeditorial.es

ISBN ebook: 978-84-1362-973-5

Está prohibida la reproducción total o parcial de este libro electrónico, su transmisión, su descarga, su descompilación, su tratamiento informático, su almacenamiento o introducción en cualquier sistema de repositorio y recuperación, en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, conocido o por inventar, sin el permiso expreso escrito de los titulares del Copyright.